EL NACIMIENTO DEL AMAZONAS • GRANDES TELESCOPIOS DEL FUTURO

INVESTIGACION y CIENCIA

JULIO 2006
6,00 EUROS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

LOS PRIMEROS MICROSEGUNDOS

COMPUTADORES DE ADN

FULGURACIONES SOLARES

ENFERMEDAD DE ALZHEIMER

HISTORIA DE LA REGLA DE CALCULO

FLUCTUACIONES CLIMATICAS





Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Julio de 2006

Número 358



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344   Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

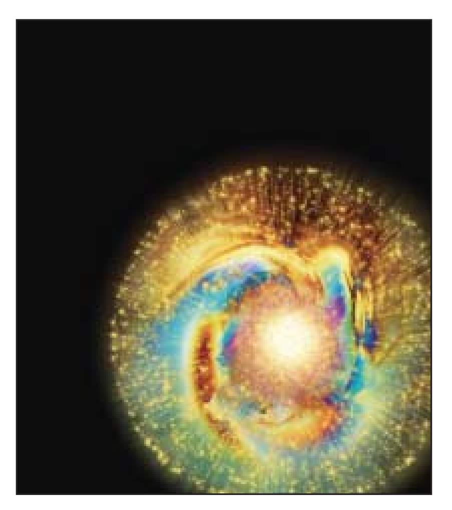
Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Los primeros microsegundos*; Joandomènec Ros: *El nacimiento del Amazonas*; M.ª Rosa Zapatero: *El origen de las fulguraciones solares*, *Los grandes telescopios del futuro*; Juan Manuel Gonzalez Mañas: *Desactivar la enfermedad de Alzheimer*; Luis Bou: *Historia de la regla de cálculo*, *Orígenes de la teoría de nudos*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes, Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	**Dos años**
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X   Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

UN OJEO AL ÁTOMO. «Hasta los colegiales más retrasados saben hoy de la existencia de los átomos. Saben incluso qué aspecto tienen. La imagen de un pequeño núcleo esférico envuelto en una nube de electrones constituye la imagen distintiva de nuestros tiempos. En 1951 el autor comenzó a pensar en otro modo de examinar los núcleos. La idea era bombardearlos con electrones ultraveloces y observar cómo éstos se desviaban, o, en el lenguaje de los físicos, se dispersaban. En 1951, en la Universidad de Stanford se estaba construyendo un gran acelerador lineal capaz de generar haces de electrones con energías cercanas a los mil millones de electronvolt. Las correspondientes longitudes de onda serían del orden de unos pocos fermi, lo bastante cortas para revelar con un detalle considerable la estructura nuclear. —Robert Hofstadter.» [*Nota de la redacción: en 1961, Hofstadter recibió el premio Nobel de Física por este trabajo.*]

ALEGRÍA COMUNISTA. «A los catorce físicos estadounidenses y a los siete británicos que el mes pasado asistieron en Moscú a la conferencia sobre física de altas energías les impresionó la amabilidad de sus anfitriones, así como la ausencia de secretismo. La atmósfera relajada parecía deberse, al menos en parte, a los cambios políticos dentro de la Unión Soviética. Informó Victor F. Weisskopf, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que las investigaciones soviéticas ya se estaban beneficiando del regreso a las universidades e institutos de numerosos científicos que habían estado internados en campos de trabajo. La liberación de presos, afirmó, ha contribuido a eliminar el ambiente de temor en la Unión Soviética.»

...cien años

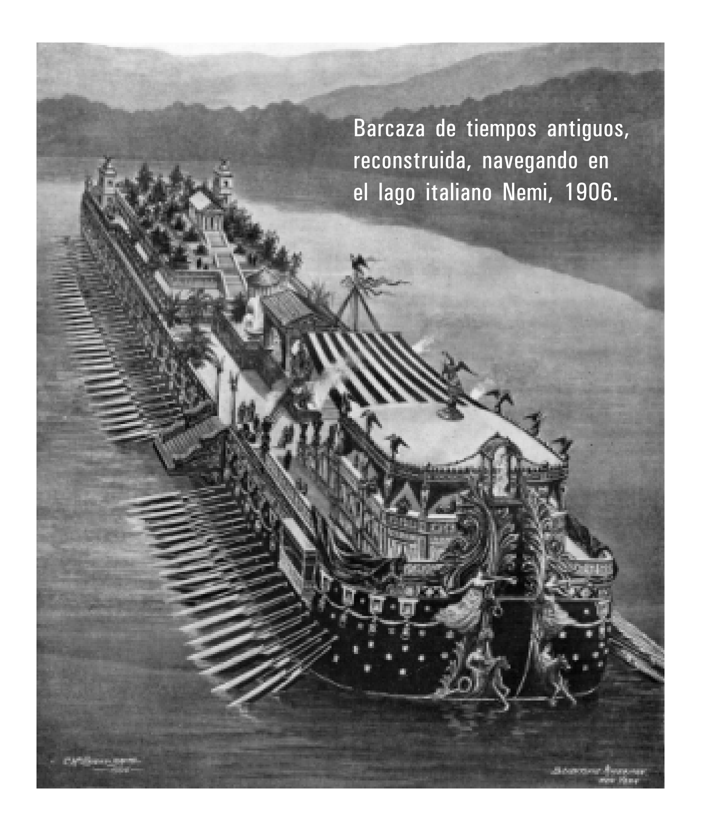
UNA GALERA ROMANA IMPERIAL. «Sepultadas bajo las aguas del lago Nemi yacen dos galeras de recreo, que pertenecieron a los emperadores Tiberio y Calígula. Contienen tesoros de arte codiciados desde hace quinientos años. De su tamaño poco común (las galeras de guerra eran mucho menores) se deduce que debieron de emplearse como barcazas de recreo. A partir de los descubrimientos realizados por los buzos podemos hacernos una idea de la constitución de las embarcaciones, aun cuando no podamos todavía ofrecer una reconstrucción absolutamente exacta [*ilustración*].»

CALDERAS RADIACTIVAS. «La Tierra ya no se considera una esfera inmensa de materiales líquidos o semilíquidos rodeada de una corteza sólida de espesor indeterminado, sino un globo más bien sólido. Si descartamos la idea de que las bolsas de lava no constituyen sino efusiones de una masa central fundida (porque tales efusiones se habrían solidificado hace millones de años), el paso siguiente consistirá en averiguar la causa del calor interno de la lava. El mayor Clarence F. Dutton sostiene que el calor debe de generarse dentro o alrededor de la lava fundida. Es algo admitido que nuestro planeta contiene radio o minerales radiactivos. Se han efectuado cálculos, aproximados, desde luego, pero aun así lo bastante precisos, que sugieren que el calor desarrollado por el radio subterráneo es mucho mayor del que puede radiarse al espacio.»

...ciento cincuenta años

FERROCARRILES PELIGROSOS. «Ni en seguridad ni en confort pueden nuestros ferrocarriles, ni los ingleses, compararse con los prusianos. Durante el año pasado ni una vida se perdió en Prusia por negligencia de sus responsables; en conjunto, se produjeron sólo dos desgracias fatales. A fin de cuentas, hay cosas en los gobiernos absolutistas que merecen imitarse; tal es sin duda el caso de la gestión de los ferrocarriles. Lo nuestros son más seguros que hace algunos años; pero podrían ser mejores. Por ahora, parece que nuestros transportes públicos no conceden sino escaso valor a la vida de los ciudadanos republicanos.»

NABUCODONOSOR. «El *Atlas*, de Londres, publica que el coronel Rawlinson acaba de hallar una momia que se cree corresponde a la de Nabucodonosor. La cara, de belleza notable, está cubierta con una máscara de oro. Esperemos que no sea un fiasco.»



Barcaza de tiempos antiguos, reconstruida, navegando en el lago italiano Nemi, 1906.

APUNTES

COSMOQUIMICA

Un nuevo origen de los elementos

Durante decenios, se ha creído que las supernovas, los restos explosivos de las estrellas gigantes, desencadenan reacciones en las que se crea la mayoría de los elementos pesados del universo. Pero esas reacciones no explican la aparición de isótopos poco corrientes de ciertos metales, como el molibdeno y el rutenio, presentes en el Sol y en los meteoritos. Podrían generarlos los antineutrinos, unas partículas evasivas de masa insignificante. En los primeros segundos tras una explosión de supernova aparece una zona, rica en protones, que ciñe al núcleo de la estrella muerta, seguramente convertido en una estrella de neutrones. Los chorros masivos de antineutrinos que manan de la estrella de neutrones podrían irradiar los protones y transformar algunos de éstos en neutrones, que forman isótopos pesados y estables. Semejante proceso explicaría la abundancia sorprendente de ciertos elementos pesados, como el estroncio, en estrellas que se caracterizan por su escasez en metales. *—Charles Q. Choi*



Las supernovas podrían generar isótopos metálicos poco comunes.

MICROBIOLOGIA

Los antibióticos, las bacterias y las células humanas

Varias maneras tienen los antibióticos de seleccionar las bacterias como blancos que deben destruir sin perturbar las células humanas. La mayoría de las paredes celulares de las bacterias contienen una macromolécula, el peptidoglicano, que las células humanas no generan ni necesitan. La penicilina, por ejemplo, impide la fase final de enlaces cruzados, o transpeptidización, del ensamblaje de la macromolécula. Se forma en consecuencia una pared frágil, que explota y mata a la bacteria. Ciertos fármacos atacan el metabolismo bacteriano. Las sulfamidas son estructuralmente similares al ácido para-aminobenzoico, compuesto necesario para la síntesis del ácido fólico. Las vitaminas se difunden fácilmente en el interior de las células humanas; no pueden, sin embargo, entrar en las células bacterianas. Ello significa que las bacterias deben fabricar sus vitaminas. Las sulfamidas, al inhibir una enzima fundamental del proceso impiden la proliferación bacteriana. Otro antibiótico, la tetraciclina, se interpone en el desarrollo de las bacterias al detener la síntesis proteica. Las células, tanto las bacterianas como las humanas, sintetizan las proteínas en los ribosomas, estructuras constituidas por ARN y proteína. La tetraciclina se une a un lugar del ribosoma y bloquea una interacción clave del ARN, cortando así el crecimiento de la cadena proteínica. En las células humanas, la tetraciclina no se acumula en cantidades suficientes para frenar la síntesis proteínica. Otro proceso celular, imprescindible de las bacterias a los organismos superiores, es la replicación del ADN. La ciprofloxacina, un antibiótico, puede dirigirse específicamente contra la ADN-girasa, una enzima esencial para las bacterias. Pero ese antibiótico no afecta a las ADN-girasas humanas.

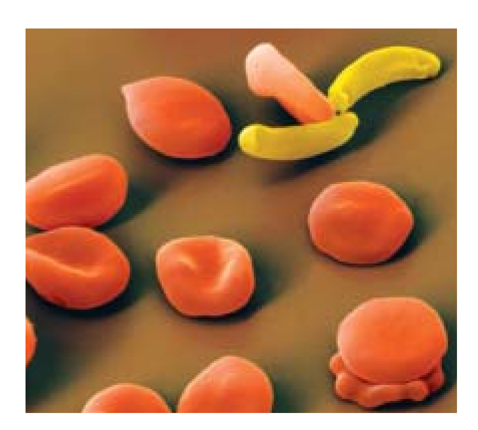
—Harry Mobley
Depto. de Microbiología e Inmunología,
Universidad de Michigan

PARASITOLOGIA

Islas de resistencia

Cuando se habla de detener la malaria, se calibra, entre otras, la posibilidad de introducir en los mosquitos un gen que les confiera resistencia al parásito de la malaria, *Plasmodium falciparum*, transmitido por esos insectos de una persona a otra. ¿Se nos ha adelantado la naturaleza? Se recogieron miles de mosquitos en las cabañas de Mali y se hizo que parte de su descendencia se alimentara de sangre de una persona infectada. De 101 linajes, 22 no mostraron vestigios de *Plasmodium*. Un resultado, en verdad, sorprendente. La resistencia parece tener su origen en un gen o genes situados en un segmento de cromosoma, o "isla de resistencia al *Plasmodium*". Para combatir la malaria podrían seleccionarse como diana los insectos portadores de la variante génica que confiere vulnerabilidad. Valdría para ello un hongo letal recién descubierto: parece mostrar preferencia por los mosquitos henchidos de *Plasmodium.*

—J. R. Minkel

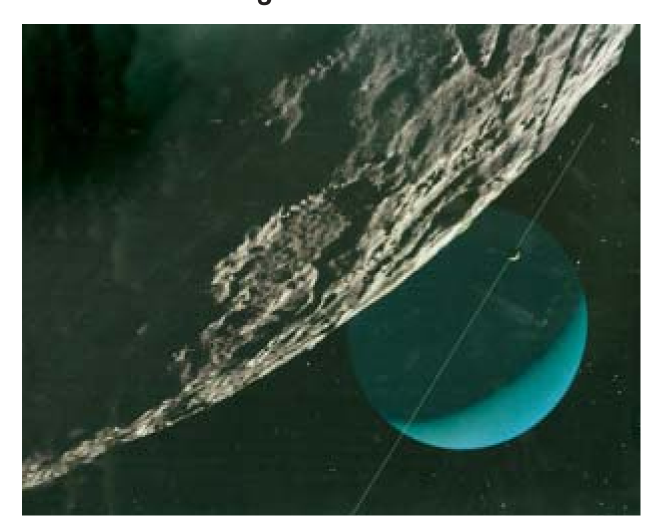


Protozoos de la malaria (*arriba derecha*) junto a células sanguíneas.

MARK GARLICK *Photo Researchers, Inc. (arriba); Photo Researchers, Inc. (abajo)*

ASTRONOMIA

La huella de la gravedad



Inclinación axial de Urano visto desde Umbriel, una de sus mayores satélites.

Cuando no saben explicar alguna extraña característica del sistema solar, los astrónomos suelen recurrir a las colisiones. Tritón gira alrededor de Neptuno en sentido contrario a las otras lunas del planeta. Hasta ahora se suponía que llegó de muy lejos y expulsó de un golpe a una luna anterior. Pero, según se aduce en el número de *Nature* del 11 de mayo, de un par de objetos ligados gravitatoriamente que pasase ante Neptuno, el que más lento se moviera con respecto al planeta podría haber quedado atrapado por su gravedad y haberse puesto a girar a su alrededor. El más rápido continuaría su trayectoria. En los últimos años se han encontrado en la periferia del sistema solar numerosos pares de cuerpos celestes que remedan el fenómeno de marras. Análogamente, la gravedad podría explicar mejor que un impacto de refilón de un protoplaneta la inclinación axial de 98 grados de Urano y sus lunas con respecto al plano orbital del planeta. Fundándose en las trayectorias que se les suponen a los planetas gaseosos gigantes en sus primeros tiempos, una simulación, publicada también en *Nature,* indica que la oscilante rotación de Saturno alrededor de sí mismo podría haberle dado a Urano un ligero empujón, en alguno de sus encuentros.

—J. R. Minkel

NEUROLOGIA

¿Para qué sirve una neurona nueva?

En recintos espaciosos, con juguetes y ruedas giratorias, los roedores adultos crean más neuronas de lo normal. Se ha supuesto, fundados en tal observación, que la formación de neuronas, o neurogénesis, atempera la ansiedad y refuerza la capacidad de aprendizaje y la memoria ligadas a un entorno variado. A fin de comprobar esta relación, en la Universidad de Columbia se inutilizó con radiación la región del hipocampo donde los ratones generan las neuronas nuevas. El resultado no fue el esperado: situados en un entorno enriquecido, los ratones irradiados se comportaron en las pruebas de aprendizaje espacial igual que los ratones sin irradiar; además, unos y otros se mostraron bastante tranquilos. Parece, pues, que la neurogénesis no es la razón de los efectos de un entorno ameno, al menos en los ratones. El estudio plantea cuestiones particularmente sugestivas sobre la función de la neurogénesis en los humanos, pues según algunas investigaciones habría que tenerla en cuenta en el tratamiento de la depresión.

—J. R. Minkel



Es posible que la neurogénesis no rebaje la ansiedad ni favorezca el aprendizaje.

FISICA Y SOCIEDAD

Atomos por la paz

A lo largo del siglo XX los físicos han intervenido en cuestiones militares. Recuérdese su papel determinante en la fabricación de las bombas que cayeron sobre Hiroshima y Nagasaki. Edward Teller, uno de los creadores de la bomba de hidrógeno, fue un decidido partidario del armamento nuclear, pero otros físicos que intervinieron en el advenimiento de la era atómica, como Albert Einstein, Leo Szilárd, Robert Oppenheimer o Hans Bethe, combatieron después la carrera de armamentos. Jorge Hirsh, especialista en superconductores y creador del número *h*, que mide la influencia de un científico a través de la repercusión de sus artículos, acaba de dirigirle una carta al presidente norteamericano contra la posibilidad de emplear armamento nuclear en el marco de la tensión creada por el enriquecimiento de uranio en Irán. Al texto se han sumado, entre otros físicos eximios, Edward Witten, Philip Anderson, Anthony Leggett, Leo Kadanoff, Frank Wilczek y David Gross.

RON MILLER (*arriba*); CORBIS (*abajo*)

Los primeros microsegundos

Experimentos recientes han reproducido las condiciones del universo naciente, con resultados inesperados

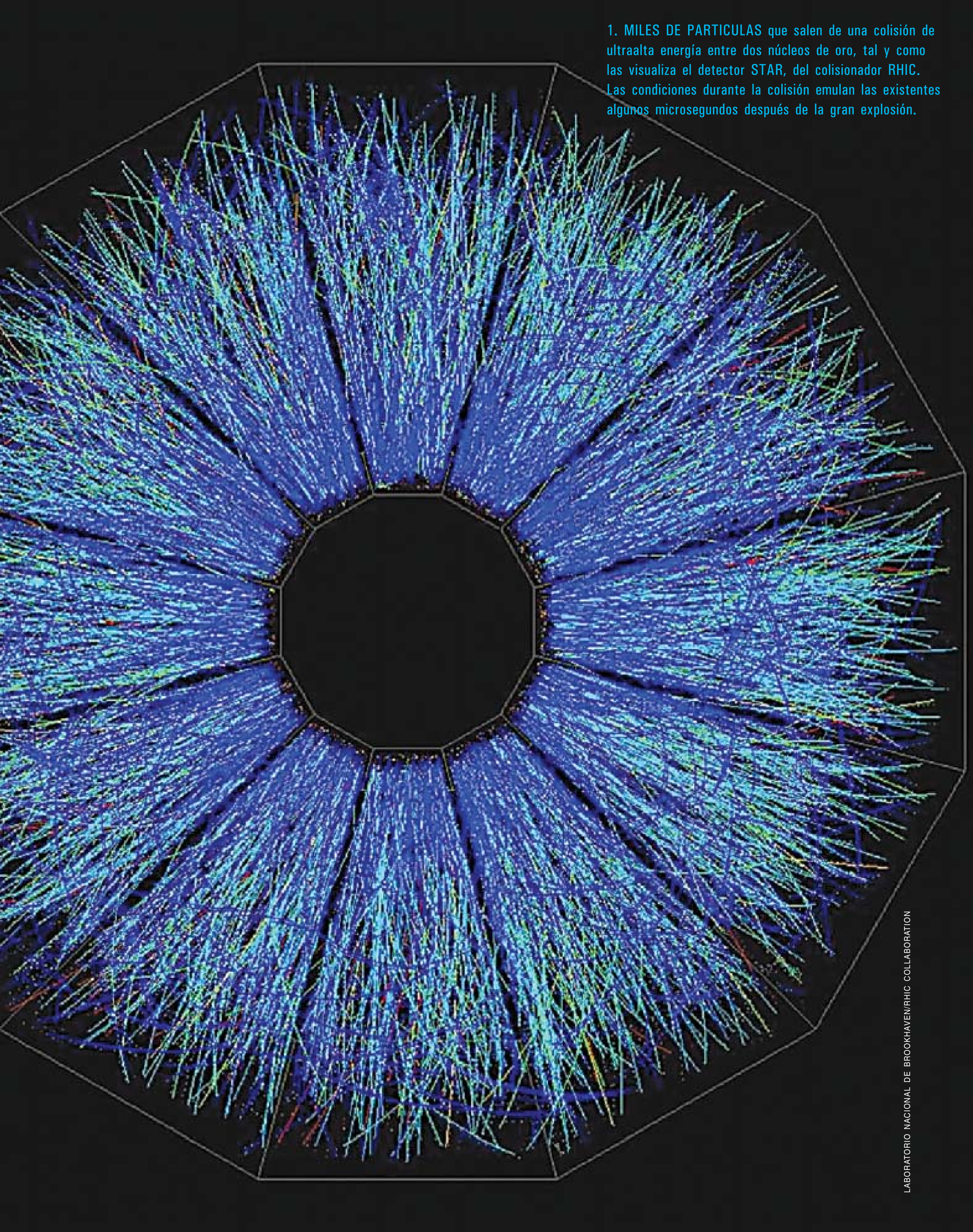
Michael Riordan y William A. Zajc

Durante los últimos cinco años, centenares de científicos han estado utilizando un nuevo y potente destructor de átomos, el Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC), en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, para reproducir las condiciones que existieron en el inicio del universo. Ese acelerador hace chocar frontalmente dos haces de núcleos de oro que viajan próximos a la velocidad de la luz. Las colisiones resultantes entre esos pares de núcleos atómicos generan chorros extraordinariamente calientes y densos de materia y energía que simulan lo que sucedió durante los primeros microsegundos tras la gran explosión. Estas breves "pequeñas explosiones" ofrecen una imagen muy aproximada de instantes muy cercanos a la creación.

En esos primeros momentos, la materia era un caldo sumamente caliente y denso de quarks y gluones, que vagaban a gran velocidad y chocaban entre sí al azar. Algunos electrones, fotones y otras partículas elementales ligeras sazonaban la sopa. Esta mezcla tenía una temperatura de billones de grados, más de 100.000 veces la del núcleo del Sol. Pero la temperatura descendió bruscamente a medida que el cosmos se expandía, igual que un gas ordinario de hoy cuando se expande rápidamente. Gracias al consiguiente frenado, empezó a haber uniones efímeras de quarks y gluones. Transcurridos unos 10 microsegundos, las interacciones fuertes que había entre ellos los ligaron permanentemente, quedando atrapados dentro de protones, neutrones y otras partículas que interaccionan fuertemente; a estas partículas compuestas se las llama "hadrones". Un cambio repentino en las características de un material recibe el nombre de transición de fase (como el agua líquida cuando se congela). La transición de fase cósmica que convirtió la mezcla original de quarks y gluones en los protones y neutrones actuales es de gran interés lo mismo para quienes quieren saber cómo adquirió el universo su estado actual, tan estructurado, que para quienes desean entender mejor las fuerzas fundamentales.

Los protones y los neutrones que hoy forman los núcleos de cada átomo son gotitas residuales de aquel mar primordial, minúsculas celdas subatómicas donde, encadenados para siempre, se agitan los quarks. Incluso en colisiones violentas, cuando los quarks parecen estar a punto de escapar, se forman nuevas paredes para mantenerlos confinados. Aunque muchos lo han intentado, nunca se ha observado un quark solitario en un detector de partículas.

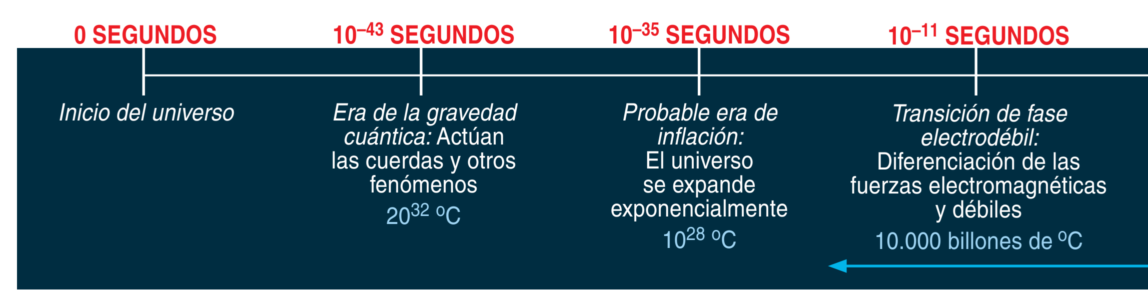
El RHIC ofrece una excelente oportunidad de observar quarks y gluones liberados de protones y neutrones, en un estado colectivo casi libre, evocador de los primeros microsegundos del mundo. En un principio se llamó a esa mezcolanza "plasma de quarks y gluones", porque se esperaba que se comportara como un gas ultracaliente de partículas cargadas (es decir, un plasma), similar a la parte interna de un relámpago. El RHIC, al aplastar unos núcleos pesados contra otros y



1. MILES DE PARTICULAS que salen de una colisión de ultraalta energía entre dos núcleos de oro, tal y como las visualiza el detector STAR, del colisionador RHIC. Las condiciones durante la colisión emulan las existentes algunos microsegundos después de la gran explosión.

LABORATORIO NACIONAL DE BROOKHAVEN/RHIC COLLABORATION

2. ESTA LINEA CRONOLOGICA COSMICA muestra algunas eras significativas de la primitiva historia del universo. Los experimentos —SPS, RHIC y el futuro LHC— se remontan más y más en el tiempo, hasta los primeros microsegundos, cuando existió el medio de quarks y gluones.



destruirlos en "pequeñas explosiones" que brevemente liberan sus quarks y gluones, sirve como una especie de telescopio en el tiempo que proporciona breves vistas del universo primitivo, del reinado absoluto del plasma ultracaliente y superdenso de quarks y gluones. Pues bien: por ahora, la mayor sorpresa del RHIC es que esa sustancia exótica recuerda mucho más a un líquido, aunque de propiedades muy especiales, que a un gas.

Liberar los quarks

En 1977, cuando el teórico Steven Weinberg publicó su libro "Los tres primeros minutos" —del universo—, evitó cualquier conclusión definitiva sobre la centésima de segundo inicial. Escribió: "Aún no sabemos lo suficiente de la física de las partículas elementales como para calcular con alguna confianza las características de aquella mezcla. Nuestra ignorancia de la física microscópica es un velo que nos oculta el comienzo genuino".

Pero los progresos teóricos y experimentales empezaron por aquellos años a levantar ese velo. No sólo se encontró que los protones, los neutrones y demás hadrones contenían quarks. A mediados de los años setenta aparecía una teoría de la fuerza fuerte entre los quarks, la cromodinámica cuántica, o QCD: una cohorte de ocho partículas neutras, los gluones, revolotea entre los quarks y los somete a la fuerza implacable que los confina en los hadrones.

De la QCD intriga especialmente su relación con la distancia: contrariamente a lo que sucede con las fuerzas de la gravedad y el electromagnetismo, la constante de acoplamiento de la interacción fuerte se debilita cuando unos quarks se acercan a otros. Se ha denominado a este comportamiento que desafía a la intuición "libertad asintótica": cuando dos quarks están mucho más cerca el uno del otro que el diámetro de un protón (unos 10^{-13} centímetros), sienten una fuerza reducida, que se puede calcular con precisión mediante las técnicas al uso. Sólo cuando un quark comienza a separarse de sus socios la interacción se hace verdaderamente fuerte y tira de la partícula hacia atrás, como la correa del perro.

En física cuántica, las distancias cortas entre partículas se asocian a colisiones de alta energía. Así, la libertad asintótica adquiere importancia a temperaturas elevadísimas cuando las partículas están muy juntas y colisionan a altas energías entre sí, una y otra vez.

La libertad asintótica de la QCD permite levantar el velo de Weinberg para averiguar qué sucedió en los primeros microsegundos. Mientras la temperatura estuvo por encima de unos 10 billones de grados, los quarks y los gluones actuaron con independencia. Incluso a temperaturas más bajas, de hasta dos billones de grados, los quarks vagaban solos, aunque por entonces debían de ir empezando a sentir que la fuerza confinante de la QCD tiraba de ellos.

Para simular tan extremas condiciones en la Tierra, deben recrearse las elevadísimas temperaturas, presiones y densidades de aquellos primeros microsegundos. La temperatura es, básicamente, la energía cinética media de una partícula en un enjambre de partículas similares; la presión aumenta con la densidad de energía del enjambre. Por lo tanto, si se comprime tanta energía como se pueda en el menor volumen posible, se estará más cerca de las condiciones de la gran explosión.

Afortunadamente, la naturaleza proporciona unas cápsulas de materia densísimas: los núcleos atómicos. Si se pudiera juntar un dedal de esa materia nuclear, pesaría 300 millones de toneladas. Tres décadas de experiencia estrellando unos núcleos pesados —de plomo o de oro— contra otros a altas energías han demostrado que las densidades que se generan durante esas colisiones sobrepasan de lejos las de la materia nuclear normal. Y las temperaturas producidas quizás hayan superado los cinco billones de grados.

El choque de núcleos pesados, cada uno con alrededor de 200 protones y neutrones, engendra un infierno mucho peor que el que aparece en las colisiones de protones sueltos (las que se utilizan en otros experimentos de la física de altas energías). En vez de una explosión minúscula con docenas de partículas salientes, en las colisiones de iones pesados se crea una "bola de fuego" formada por millares de partículas, tantas como para que las características colectivas de la bola de fuego —su temperatura, densidad, presión y viscosidad, o resistencia a fluir— sean parámetros úti-

Resumen/Pequeñas explosiones

- En los primeros 10 microsegundos después de la gran explosión, el universo consistía en un hirviente remolino de partículas elementales, los quarks y los gluones. Desde entonces, quarks y gluones han estado encerrados dentro de los protones y neutrones que forman los núcleos de los átomos.
- Durante los últimos cinco años, los experimentos realizados con el Colisionador Relativista de Iones Pesados (RHIC) han recreado el plasma de quarks y gluones a una escala microscópica mediante el choque entre sí de núcleos de oro que se mueven casi a la velocidad de la luz. Para gran sorpresa de los físicos, el medio producido en estas "pequeñas explosiones" se comporta no como un gas, sino como un líquido casi perfecto.
- Los resultados significan que puede que tengan que revisarse los modelos del universo primitivo. Algunas hipótesis que se adoptan para simplificar los cálculos referentes a los quarks y gluones también han de reexaminarse.

LUCY READING-IKKANDA (*arriba*)

0,1 MICROSEGUNDOS — 20 billones de ºC

1 MICROSEGUNDO — 6 billones de ºC

10 MICROSEGUNDOS — Los quarks se ligan en protones y neutrones. 2 billones de ºC

100 SEGUNDOS — *Nucleosíntesis:* Formación de helio y otros elementos a partir de hidrógeno. Mil millones de ºC

380.000 AÑOS — Se forman los primeros átomos neutros. 2700 ºC

LHC — RHIC — SPS (CERN)

Medio de quarks y gluones

les y significativos. La distinción es importante; lo es también la diferencia entre el comportamiento de algunas moléculas de agua aisladas y la conducta de una gota entera.

Los experimentos del RHIC

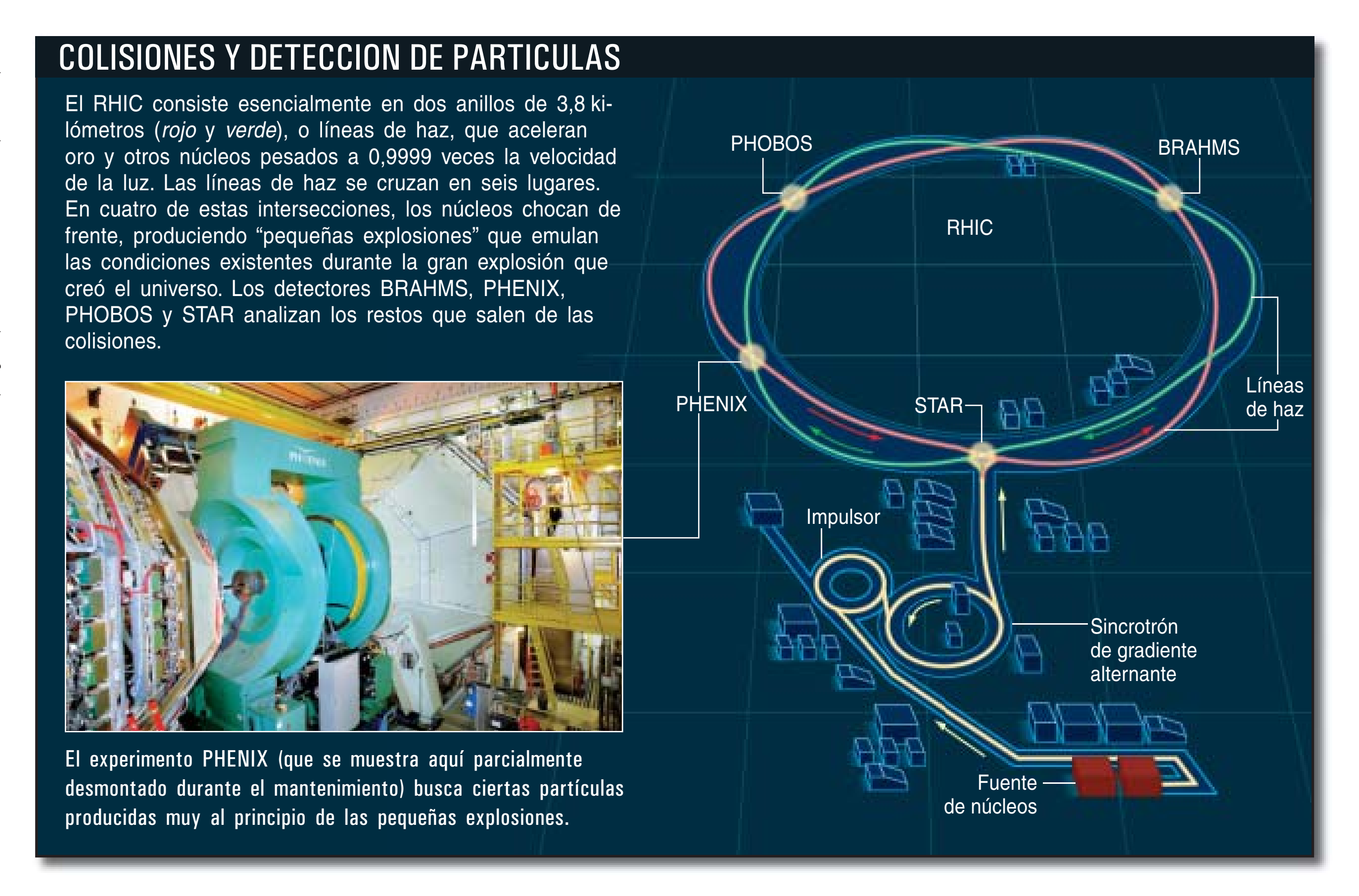
El RHIC, costeado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos y del que se encarga Brookhaven, es la instalación más reciente para el estudio de las colisiones de iones pesados. Los anteriores aceleradores nucleares lanzaban haces de núcleos pesados sobre blancos metálicos inmóviles. En el colisionador RHIC, en cambio, dos haces de núcleos pesados chocan entre sí. Las colisiones frontales resultantes generan energías mucho mayores para la misma velocidad de las partículas, porque toda la energía disponible se dedica a la creación de subproductos. Recuerda lo que sucede cuando dos coches chocan de frente a gran velocidad. Su energía de movimiento se convierte en energía térmica aleatoria de las partes y fragmentos desprendidos, que salen disparados en todas las direcciones.

A las energías altamente relativistas que les imparte el RHIC, los núcleos viajan a más del 99,99 por ciento de la velocidad de la luz; cada protón o neutrón de su interior alcanza una energía de hasta 100 gigaelectronvolt (GeV). (Un GeV viene a equivaler a la masa de un protón inmóvil.) Dos series de 870 imanes superconductores refrigerados por toneladas de helio líquido conducen los haces de núcleos por dos anillos entrelazados de 3,8 kilómetros de longitud. Chocan en los cuatro puntos donde los anillos se cruzan. Cuatro detectores de partículas, BRAHMS, PHENIX, PHOBOS y STAR, registran los restos subatómicos que salen disparados en las violentas colisiones que suceden en dichas intersecciones.

Cuando dos núcleos de oro chocan de frente a la energía más alta alcanzable en el RHIC, descargan más de 20.000 GeV en una bola de fuego de apenas una billonésima de centímetro de diámetro. Los núcleos y sus protones y neutrones constituyentes se funden y, a partir de toda esa energía disponible, se crean muchos más quarks, antiquarks (la antimateria de los quarks) y gluones. Más de 5000 partículas elementales se liberan brevemente. La presión generada en el momento de la colisión alcanza unas 10^{30} veces la presión atmosférica. En el interior de la bola de fuego, la temperatura se eleva a billones de grados.

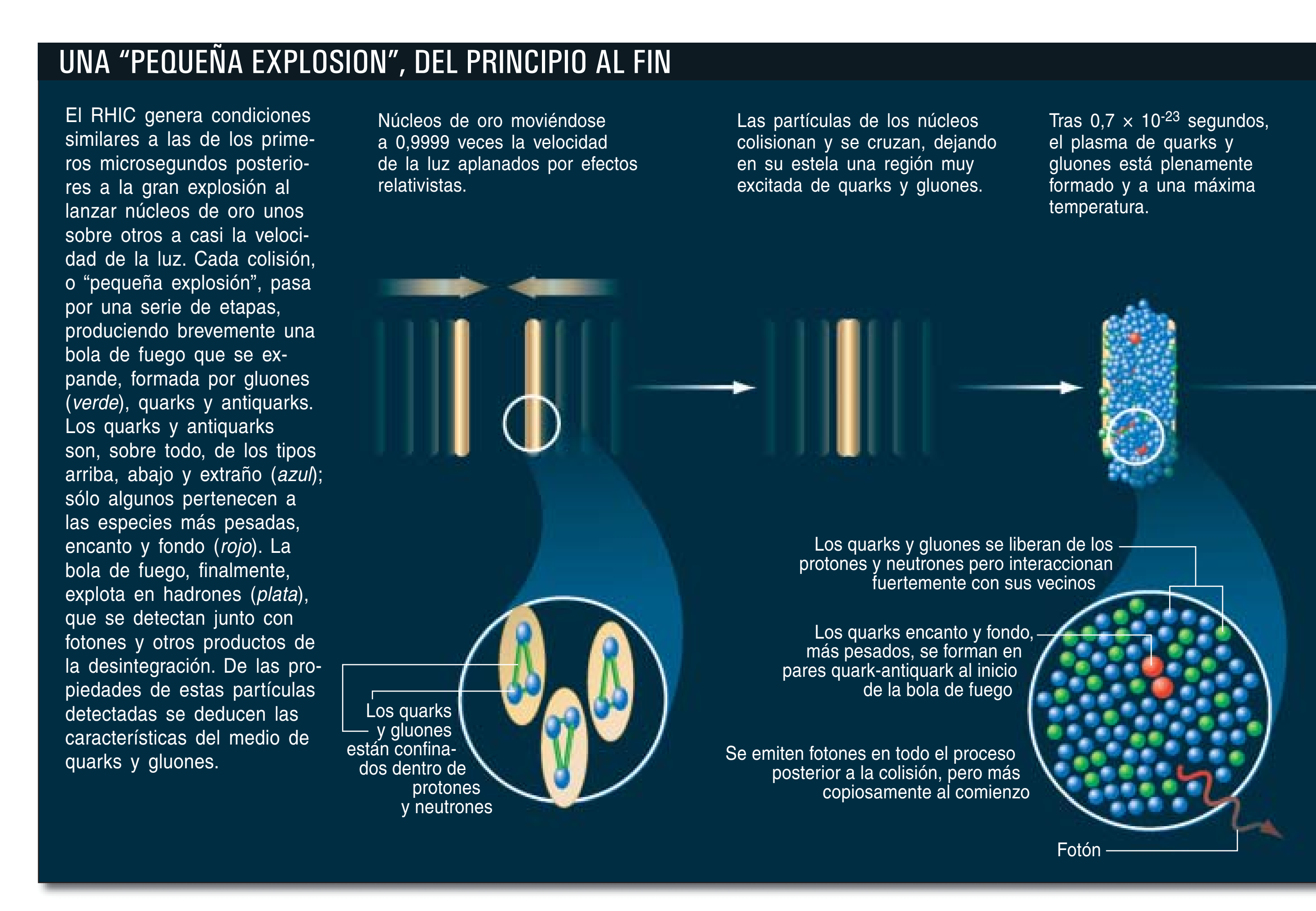
COLISIONES Y DETECCION DE PARTICULAS

El RHIC consiste esencialmente en dos anillos de 3,8 kilómetros (*rojo* y *verde*), o líneas de haz, que aceleran oro y otros núcleos pesados a 0,9999 veces la velocidad de la luz. Las líneas de haz se cruzan en seis lugares. En cuatro de estas intersecciones, los núcleos chocan de frente, produciendo “pequeñas explosiones” que emulan las condiciones existentes durante la gran explosión que creó el universo. Los detectores BRAHMS, PHENIX, PHOBOS y STAR analizan los restos que salen de las colisiones.



El experimento PHENIX (que se muestra aquí parcialmente desmontado durante el mantenimiento) busca ciertas partículas producidas muy al principio de las pequeñas explosiones.

LABORATORIO NACIONAL DE BROOKHAVEN/RHIC COLLABORATION (*fotografía*); LUCY READING-IKKANDA (*ilustración*)



Pero unas 50 billonésimas de billonésima (5×10^{-23}) de segundo después, todos los quarks, antiquarks y gluones se recombinan en hadrones que salen disparados hacia los detectores circundantes. Ayudados por potentes computadoras, los detectores registran tanta información como sea posible sobre los millares de partículas que les llegan. Dos de ellos, BRAHMS y PHOBOS, son más bien pequeños y se concentran en la observación de características específicas de los residuos. Los otros dos, PHENIX y STAR, están montados alrededor de dispositivos enormes, de uso más general, que llenan sus hangares experimentales de tres pisos de alto, con miles de toneladas de imanes, detectores, absorbentes y blindajes.

Los cuatro experimentos del RHIC han sido diseñados y construidos por distintos equipos internacionales, que engloban entre 60 y más de 500 científicos. Cada grupo ha empleado una estrategia diferente para abordar la complejidad de los sucesos del RHIC. La colaboración BRAHMS se centra en los remanentes de los protones y neutrones originales que salen en direcciones próximas a las de los núcleos del oro que chocan. PHOBOS observa partículas en el intervalo angular más amplio posible y estudia las correlaciones entre ellas. STAR se construyó alrededor de la “cámara digital”, la mayor del mundo: un enorme cilindro de gas que proporciona imágenes tridimensionales de todas las partículas cargadas emitidas en una gran apertura que rodea el eje del haz (*véase la figura 1*). Por último, PHENIX busca determinadas partículas, producidas muy al comienzo de las colisiones, que pueden emerger incólumes de la caldera hirviente de quarks y gluones y proporcionan una especie de retrato en rayos X del interior de la bola de fuego.

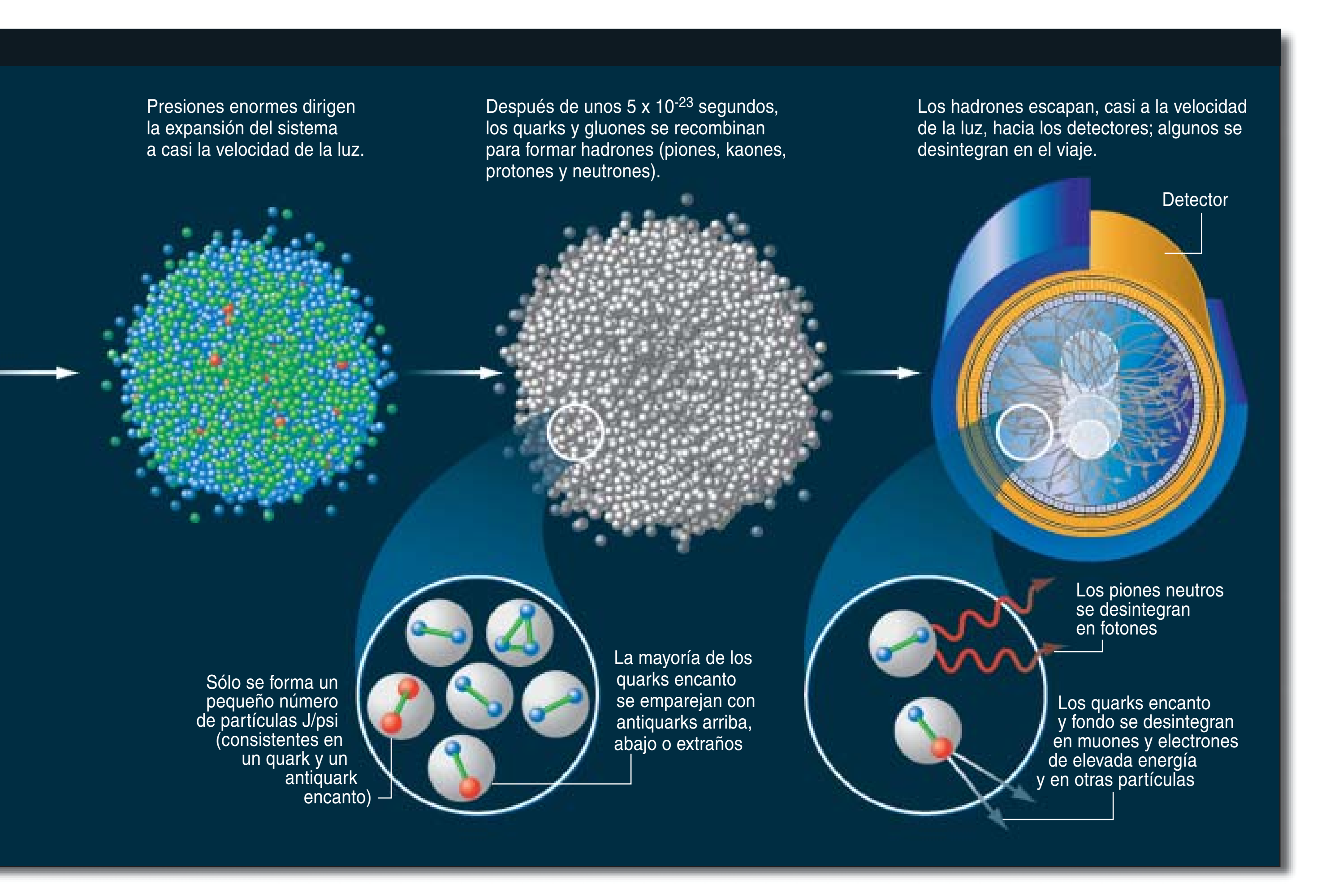
Una auténtica sorpresa

De los cuatro aparatos emerge una misma y sorprendente historia: los quarks y los gluones rompen el confinamiento y adquieren un comportamiento colectivo, aunque sólo de manera transitoria; pero esta mezcla caliente actúa como un líquido, no como el gas ideal que los teóricos habían anticipado.

Las densidades de energía alcanzadas en las colisiones frontales entre dos núcleos de oro son fantásticas. Centuplican las de los propios núcleos. En gran parte se debe a un efecto relativista, que hace que en el laboratorio, justo antes de su encuentro, se vea aplanados a ambos núcleos, como discos finísimos de protones y neutrones. Su energía se concentra en el momento del impacto en un volumen mínimo. Se calcula que la densidad de energía resultante multiplica por 15 la necesaria para liberar los quarks y los gluones. Estas partículas avanzan de inmediato en todas las direcciones, chocando repetidamente unas con otras y reajustando así sus energías en una distribución más térmica.

La prueba de la rápida formación de este medio caliente y denso viene de un fenómeno llamado “templado de chorros” (*jet quenching*). Cuando dos protones chocan a alta energía, algunos de sus quarks y gluones se topan casi frontalmente y rebotan, dando por resultado dos

LUCY READING-IKKANDA



estrechos chorros de hadrones que se mueven en direcciones opuestas. Pero los detectores PHENIX y STAR sólo registran uno de esos dos chorros en las colisiones entre los núcleos de oro. Los chorros solitarios ratifican que los quarks y gluones están chocando a alta energía. Pero, ¿dónde está el otro chorro? El quark o el gluon que rebota debe de sumergirse en el medio caliente y denso recién formado; su alta energía se disiparía tras muchos choques con quarks y gluones de baja energía. Es como disparar una bala contra el agua: casi toda su energía la absorben las moléculas del líquido, que se mueven despacio; la bala no puede atravesar la masa de agua.

En los experimentos del RHIC, las indicaciones de un comportamiento del medio de quarks y gluones parecido al de un líquido aparecieron pronto, en la forma de un "flujo elíptico". En las colisiones un poco descentradas, la distribución de los hadrones que alcanzan el detector es elíptica. Los hadrones más energéticos tienden a acumularse en el plano de la interacción, mejor que en las direcciones perpendiculares al mismo. El patrón elíptico sugiere que tiene que haber gradientes de presión considerables en el medio de quarks y gluones y que los quarks y los gluones que forman esos hadrones se estaban comportando colectivamente, al unísono, antes de reconvertirse en hadrones: no actuaban como un gas, sino como un líquido. De un gas, los hadrones hubieran salido uniformemente en todas direcciones.

Que el medio de quarks y gluones se comporte como un líquido debe significar que estas partículas interaccionan entre sí con bastante intensidad durante los violentos momentos de su liberación. La disminución de la intensidad de sus interacciones causada por la libertad asintótica de la QCD queda superada, al parecer, por el aumento del número de partículas nuevamente liberadas. Como si hubieran escapado de sus celdas sólo para encontrarse atrapados en el patio de la cárcel, donde se apretujan con los demás evadidos. El movimiento conjunto resultante coincide con el de un líquido. Una conclusión que entra en contradicción con la ingenua visión teórica inicial, que concebía ese medio como un gas casi ideal, con débiles interacciones entre sus partículas. Las características de la asimetría elíptica sugieren que tan sorprendente líquido fluye sin apenas viscosidad. Puede que se trate del líquido más perfecto jamás observado.

La nueva visión teórica

Calcular las interacciones fuertes que ocurren en un líquido de quarks y gluones comprimidos hasta densidades inimaginables y que se proyectan hacia el exterior próximo a la velocidad de la luz constituye un problema dificilísimo. Cabe buscar soluciones de la QCD mediante la fuerza bruta de enormes sistemas de microprocesadores, diseñados especialmente para dicha tarea. En este método de la QCD reticular, se sustituye el continuo espacial por una retícula de puntos. Las ecuaciones de la QCD se resuelven por aproximaciones sucesivas en el retículo.

Con la técnica mencionada se han calculado la presión y la densidad de energía en función de la temperatura. Cada una de ellas aumenta bruscamente cuando los hadrones se transforman en un medio de quarks y gluones. No obstante, el método resulta más adecuado para problemas estáticos, en los cuales el medio se halla en equilibrio termodinámico; en las pequeñas explosiones del RHIC, las condiciones cambian muy deprisa. Ni siquiera los cálculos de QCD reticular más complejos han podido determinar características dinámicas, como el templado de chorros y la viscosidad. Aunque cabe esperar que la viscosidad de un sistema de partículas con interacción fuerte sea pequeña, no puede valer exactamente cero, debido a la mecánica cuántica. Pero está costando mucho establecer cuánto llega a acercarse a cero.

Se ha contado con una ayuda inesperada: la ofrecida por la teoría de cuerdas de la gravedad cuántica. Según una extraordinaria conjetura de Juan Maldacena, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, existe una asombrosa conexión entre una teoría de cuerdas en un espacio curvado de cinco dimensiones y una teoría de partículas tipo QCD formulada en el límite cuadridimensional de ese espacio [*véase* "El espacio, ¿una ilusión?", por Juan Maldacena; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 2006]. Las dos teorías son matemáticamente equivalentes aunque parezcan describir reinos de la física radicalmente distintos. Cuando las fuerzas de tipo QCD se hacen fuertes, la correspondiente teoría de cuerdas se torna débil y, por lo tanto, más fácil de evaluar. Magnitudes como la viscosidad, difíciles de calcular en la QCD, tienen contrapartidas en teoría de cuerdas (en este caso, la absorción de ondas gravitatorias por un agujero negro) mucho más manejables. Por este camino se llega a un límite inferior muy pequeño —sin ser cero— de la viscosidad específica y menor que una décima de la del helio superfluido. Gracias a la teoría de cuerdas podremos saber mejor cómo se comportaron los quarks y los gluones durante los primeros microsegundos después de la gran explosión.

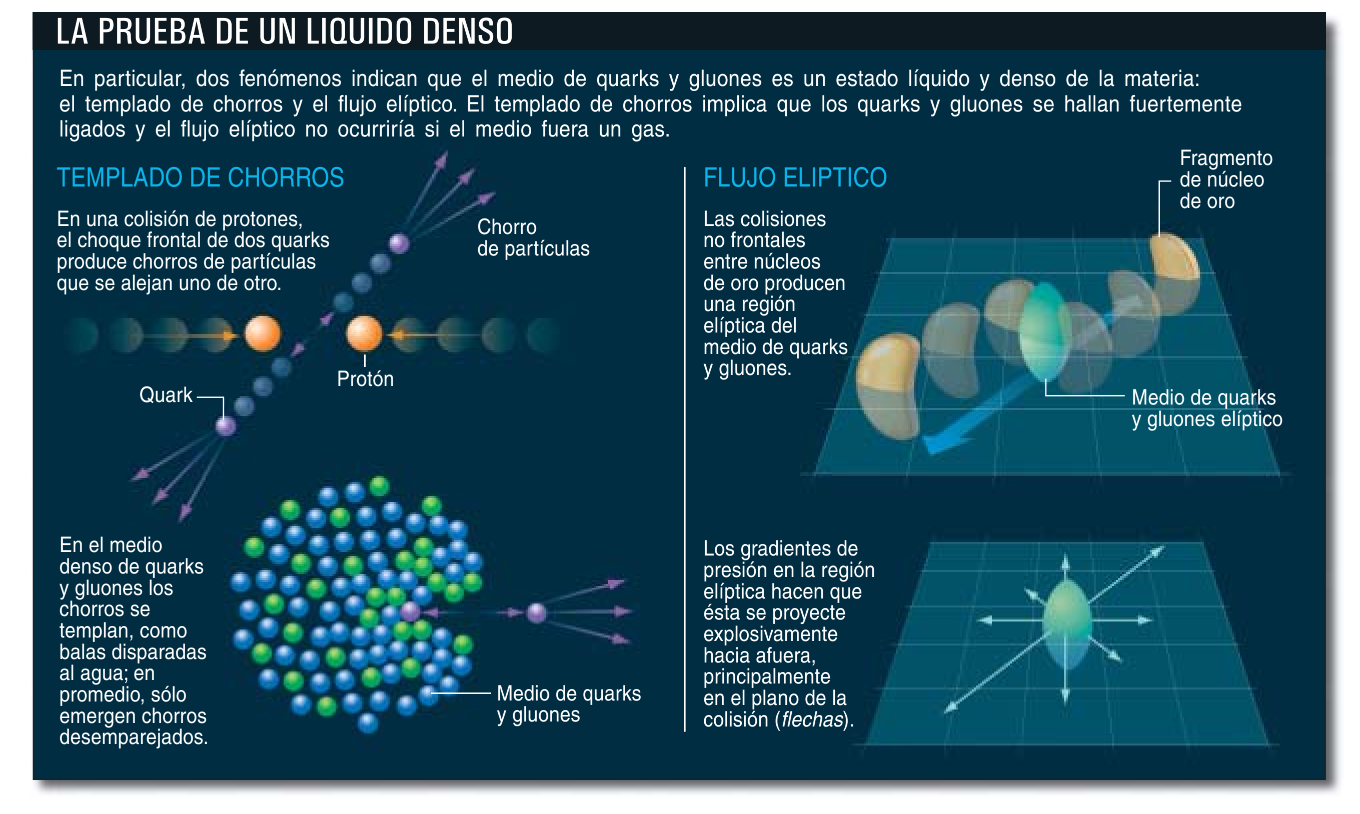
Retos futuros

Sorprende que la materia más caliente y densa jamás descubierta exceda en perfección a cualquier otro fluido. Cómo y por qué sucede es el gran desafío experimental al que ahora se enfrentan en el RHIC. La abundancia de datos que aporta está forzando a los teóricos a reconsiderar algunas ideas más asentadas acerca de la materia del universo primitivo. En el pasado, la mayoría de los cálculos trataban los quarks y gluones liberados como si hubiesen constituido un gas ideal, no un líquido. La QCD y la libertad asintótica no corren ningún peligro; ni un solo indicio pone en entredicho las ecuaciones fundamentales. Lo que se debate son las técnicas y las hipótesis simplificadoras de que se valen los teóricos para extraer conclusiones de las ecuaciones.

Para abordar estas cuestiones, los experimentadores abordan las diversas clases de quarks que emergen de las pequeñas explosiones, sobre todo las variedades más pesadas. Cuando se predijo la existencia de los quarks, en 1964, se pensaba que los habría de tres tipos: arriba, abajo y extraño. Sus masas no llegan a los 0,15 GeV; por eso los quarks de esas tres clases, y sus antiquarks, se crean copiosamente y en números casi iguales en las colisiones del RHIC. Dos quarks adicionales, llamados encanto y fondo, aparecieron en los años setenta, con masas mucho mayores, de unos 1,6 y 5 GeV, respectivamente. Debido a que se requiere mucha más energía para crearlos (según $E = mc^2$), en las pequeñas

LA PRUEBA DE UN LIQUIDO DENSO

En particular, dos fenómenos indican que el medio de quarks y gluones es un estado líquido y denso de la materia: el templado de chorros y el flujo elíptico. El templado de chorros implica que los quarks y gluones se hallan fuertemente ligados y el flujo elíptico no ocurriría si el medio fuera un gas.



LUCY READING-IKKANDA

explosiones surgen pronto (cuando las densidades de energía todavía son muy altas), pero mucho menos a menudo. Esta rareza los convierte en valiosas señales de los patrones de flujo y de otras características que se desarrollan en los primeros momentos de la evolución de una pequeña explosión.

Los experimentos PHENIX y STAR resultan idóneos para la investigación de ese tipo, porque pueden detectar electrones y otras partículas, los muones, dotadas de alta energía también, que emergen de la desintegración de los quarks pesados. Se rastrean estas y otras partículas resultantes de la desintegración hasta sus puntos de origen. Se obtiene así información crucial sobre los quarks pesados que las originaron; con sus masas mayores, tienen patrones de flujo diferentes de los de sus congéneres ligeros, mucho más abundantes. La medida de tales diferencias debería contribuir a fijar los valores precisos de la minúscula viscosidad residual.

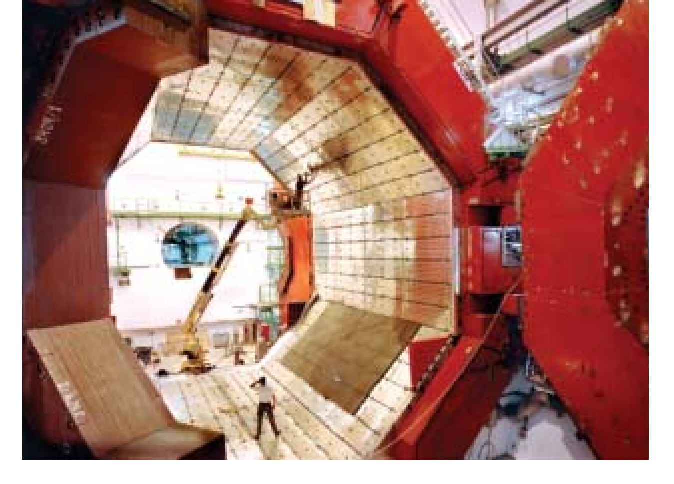
Los quarks encanto gozan de otra característica útil para sondear el medio de quarks y gluones. Un 1 por ciento de ellos, más o menos, aparecen estrechamente abrazados a un antiquark encanto, formando una partícula neutra J/psi. La separación entre los dos componentes sólo es alrededor de una tercera parte del radio de un protón; el ritmo de producción de J/psi debe mostrarse, pues, sensible a la fuerza entre quarks a cortas distancias. Los teóricos esperan que esa fuerza decaiga porque el enjambre circundante de quarks ligeros y de gluones tenderá a apantallar entre sí al quark y al antiquark encanto, conduciendo a una menor producción de J/psi.

Ciertos resultados recientes de PHENIX indican que las partículas J/psi se disuelven en el fluido, de manera similar a lo que se observó antes en el CERN, el laboratorio europeo para la física de partículas cercano a Ginebra. Incluso se esperaba que se suprimieran más los J/psi en el RHIC, debido a las mayores densidades implicadas, pero los primeros resultados sugieren que, a estas densidades, puede ocurrir algún mecanismo opuesto, una reconstitución de las partículas J/psi. Futuras mediciones se centrarán en este misterio buscando otros pares de quarks pesados y observando si, y cómo, se suprime su producción.

De acuerdo con otro enfoque se busca contemplar el fluido de quarks y gluones a través de su propia luz. Un caldo caliente de estas partículas debe brillar brevemente, como el destello de un relámpago, porque emite fotones de alta energía que escapan ilesos del medio. Igual que se mide la temperatura de una estrella remota a partir de su espectro de emisión de luz, se quiere emplear tales fotones energéticos para determinar la temperatura del fluido de quarks y gluones. Pero la medición de este espectro se nos ha venido resistiendo a los investigadores hasta la fecha por la sencilla razón de que la desintegración de ciertos hadrones, los piones neutros, genera también fotones. Aunque se producen mucho después de que el fluido de quarks y gluones se haya convertido en hadrones, ante los detectores todos parecen iguales.

Nos acercamos a la siguiente frontera de la energía, en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), del CERN. A partir de 2008, se observarán allí colisiones de núcleos de plomo con energías combinadas que excederán el millón de GeV. Un equipo internacional de más de mil físicos está construyendo el gigantesco detector ALICE, que conjugará las capacidades de los detectores PHENIX y STAR en un solo experimento. Las pequeñas explosiones del LHC alcanzarán durante un corto lapso densidades de energía varias veces mayores que la densidad de energía generada por las colisiones del RHIC; las temperaturas sobrepasarán los 10 billones de grados. Se simularán así las condiciones que se dieron durante el primer microsegundo subsiguientes a la gran explosión.

La pregunta fundamental es si el comportamiento líquido observado en el RHIC persistirá a las temperaturas y densidades más altas del LHC. Algunos prevén que la fuerza entre los quarks se hará más débil una vez que su energía media exceda 1 GeV, tal y como sucederá en el LHC, y que el plasma de quarks y gluones terminará por comportarse como un gas, según lo esperado originalmente. Otros no están tan seguros. Mantienen que la fuerza de la QCD no puede decaer con la celeridad exigida a estas energías más altas; quarks y gluones deberán seguir estrechamente acoplados en su líquido abrazo. Hemos de aguardar el veredicto del experimento, que nos puede deparar otras sorpresas.



PETER GINTER

3. EL DETECTOR ALICE empezará a funcionar en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN en el año 2008. Analizará colisiones de núcleos de plomo con energías unas 50 veces mayores que las de las "pequeñas explosiones" del RHIC.

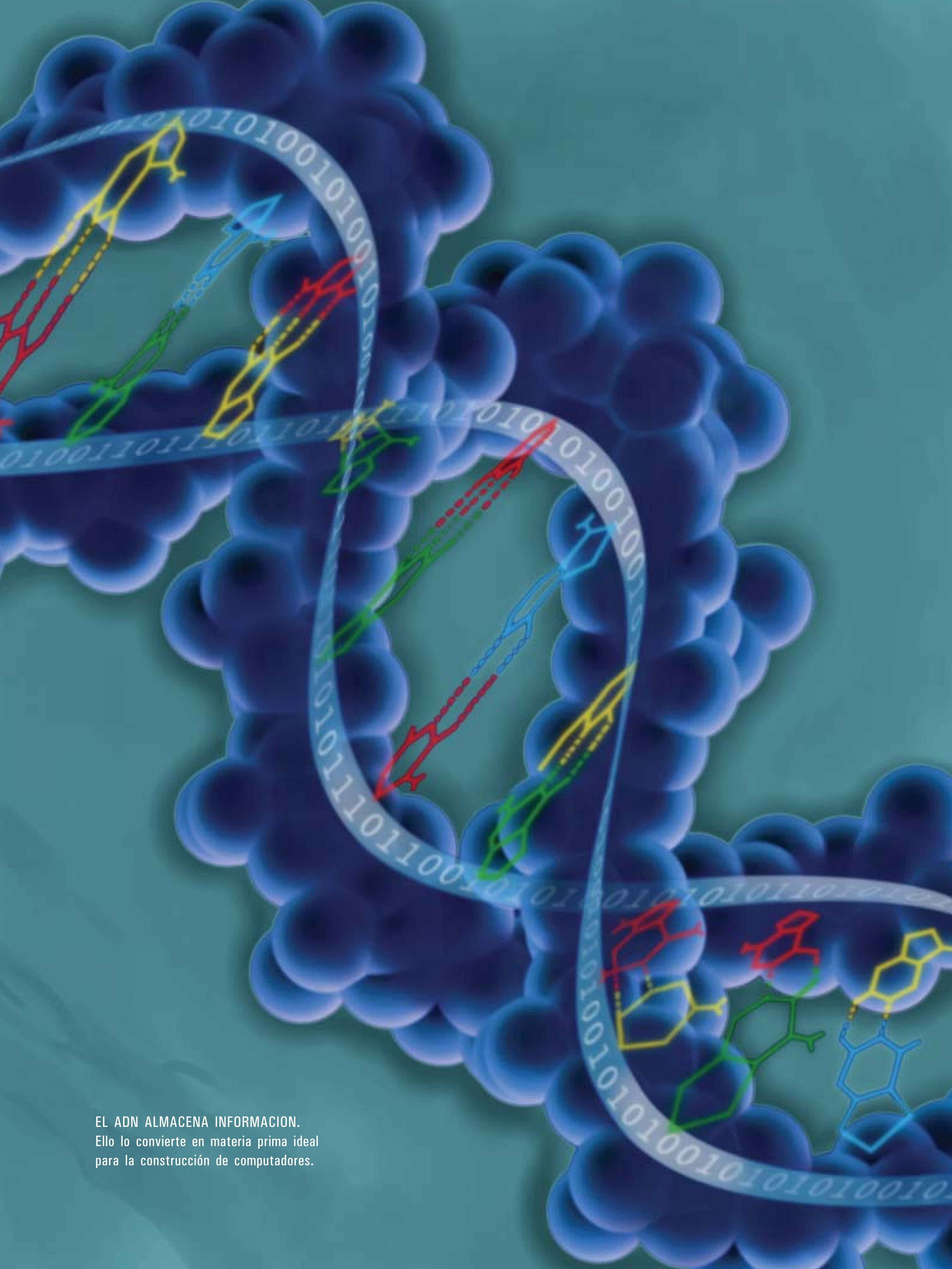
Los autores

Michael Riordan enseña historia de la física en la Universidad de Stanford y en la de California en Santa Cruz, donde es profesor adjunto de física. **William A. Zajc** da clases de física en la Universidad de Columbia. Durante los últimos ocho años ha sido el portavoz científico del experimento PHENIX del RHIC.

Bibliografía complementaria

THE RELATIVISTIC HEAVY-ION COLLIDER: CREATING A LITTLE BIG BANG ON LONG ISLAND. Frank Wolfs en *Beam Line*, páginas 2-8; primavera/verano 2001.

WHAT HAVE WE LEARNED FROM THE RELATIVISTIC HEAVY ION COLLIDER? Thomas Ludlam y Larry McLerran en *Physics Today*, vol. 56, n.º 10, págs. 48-54; octubre 2003.



EL ADN ALMACENA INFORMACION.
Ello lo convierte en materia prima ideal para la construcción de computadores.

Computadores de ADN

El potencial computador de las moléculas biológicas da origen a máquinas diminutas que hablan el lenguaje de la célula

Ehud Shapiro y Yaakov Benenson

En 1936, cuando Alan Turing concibió una máquina de cómputo programable universal, la palabra "computador" no se refería a un objeto, sino a una persona. Los informáticos de entonces se pasaban el día haciendo cálculos. Turing ideó una máquina que les relevaría, un artefacto capaz de resolver cualquier problema computable. Sentó así las bases de la teoría de la computación y de la informática. Sin embargo, nunca señaló los materiales que debían utilizarse para construirla.

La máquina puramente conceptual de Turing carecía de hilos eléctricos, transistores o puertas lógicas. De hecho, la imaginaba como una persona que tuviera ante sí una hoja de papel de longitud infinita, un lápiz y un sencillo manual de instrucciones. Este calculador incansable leería un símbolo, lo cambiaría; seguiría luego con el siguiente, de acuerdo con las reglas programadas. El proceso continuaría hasta que ya no hubiera más reglas que aplicar. Por tanto, las calculadoras electrónicas que aparecieron en los cuarenta —piezas de metal y válvulas de vacío que poco a poco se han sustituido por componentes de silicio— tal vez constituyan las únicas calculadoras no humanas que la mayoría hemos conocido. Sin embargo, no es ésta la única forma de computación posible.

Los organismos vivos, por ejemplo, realizan procesos físicos complejos controlados por información digital. Las reacciones bioquímicas y, en último término, el funcionamiento de un organismo entero, están gobernados por instrucciones almacenadas en el genoma, codificadas en secuencias de ácidos nucleicos. El sistema biomolecular que procesa el ADN y el ARN en el interior de las células guarda una estrecha semejanza con la máquina de Turing: ambos procesan la información almacenada en una secuencia de símbolos extraídos de un alfabeto fijo; ambos operan avanzando paso a paso por esas secuencias, modificando o añadiendo símbolos según unas reglas determinadas.

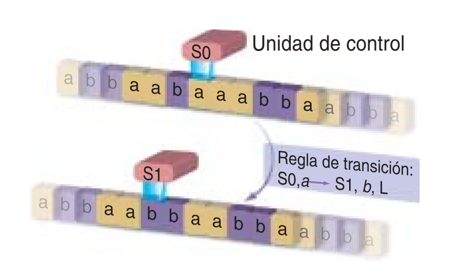
Comportamientos tan similares han sugerido que las moléculas biológicas pudieran un día convertirse en materia prima de un nuevo tipo de computadores. Estos biocomputadores no tendrían por qué aventajar en potencia de cálculo ni otras prestaciones a los ordenadores al uso. Frente a dispositivos electrónicos que hacen miles de millones de conmutaciones por segundo, las máquinas biomoleculares como los ribosomas operan sólo cientos de veces por segundo. Sin embargo, hay algo que sólo las biomoléculas pueden hacer: hablar el lenguaje de las células.

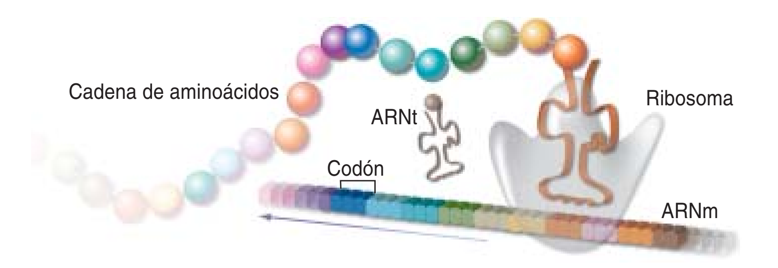
Ante los computadores construidos con moléculas biológicas se abre un horizonte prometedor: pueden operar en un entorno bioquímico, incluso en el interior de un organismo, e interactuar con ese medio a través de informaciones de entrada ("input") y salida ("output") que toman la forma de otras biomoléculas. Un computador biomolecular podría, por ejemplo, operar en el interior de una célula como si de un "doctor" se tratara: detectaría síntomas de enfermedad, las procesaría con arreglo a sus conocimientos médicos previamente programados y emitiría una señal o un fármaco.

MATT COLLINS

MAQUINAS DE COMPUTO: CONCEPTUAL Y NATURAL

El matemático Alan Turing concibió en 1936 un computador mecánico, mucho antes que pudieran verse y estudiarse las máquinas moleculares que operan en el interior de las células. Al descubrirse más tarde los diminutos autómatas naturales, aparecieron notables semejanzas con el modelo de Turing: ambos sistemas almacenan información en secuencias de símbolos, procesan paso a paso estas secuencias y modifican o añaden símbolos de acuerdo con reglas fijas.





MAQUINA DE TURING
Este dispositivo ideal opera sobre una cinta que contiene información codificada mediante símbolos como *a* y *b*. Una unidad de control con capacidad de lectura y escritura procesa la cinta, símbolo a símbolo; sigue las instrucciones de las reglas de transición, que tienen en cuenta el estado interno de la propia unidad de control. En este ejemplo, la regla de transición dicta que, si el estado de la unidad de control es 0 (S0) y el símbolo leído es *a*, entonces la unidad debe mudar su estado a 1 (S1), cambiar el símbolo a *b* y desplazarse una posición hacia la izquierda (L, de "left").

MAQUINA BIOLOGICA
Los ribosomas traducen la información codificada en los ARN mensajeros (ARNm, transcripciones de los genes) a las secuencias de aminoácidos que formarán las proteínas. El alfabeto simbólico del ARNm consta de tríos de nucleótidos, o codones; cada uno corresponde a un aminoácido específico. Conforme el ribosoma procesa la cadena del ARNm, codón a codón, unas moléculas colaboradoras, los ARN de transferencia (ARNt), proporcionan el aminoácido correspondiente. El ARNt confirma la concordancia del codón; luego libera el aminoácido, que se une a la cadena en crecimiento.

LUCY READING-IKKANDA

En los siete últimos años nos hemos esforzado en hacer esta idea realidad. Ya hemos logrado crear un autómata biológico de ADN y proteínas que detecta, en un tubo de ensayo, los síntomas moleculares de ciertos cánceres y "trata" esa patología mediante la emisión de una molécula terapéutica. La comprobación de este concepto despertó un gran interés por sus posibles aplicaciones médicas. No era, en absoluto, lo que en principio nos habíamos propuesto.

De modelos a moléculas

Uno de los autores (Shapiro) inició su investigación al advertir que las operaciones básicas de ciertas máquinas biomoleculares del interior de las células —reconocimiento de monómeros, sección y síntesis de polímeros y desplazamiento a lo largo de un polímero— podrían todas, en principio, utilizarse para la construcción de un computador universal fundado en la máquina conceptual de Turing. En esa máquina, las operaciones de computación se traducirían en operaciones biomoleculares: "reconocimiento", "sección", "ligamiento", "desplazamiento" a la izquierda o a la derecha, etcétera.

Resumen/Computadores vivientes

- Las máquinas biomoleculares procesan la información de un modo semejante a la máquina de Turing, un computador conceptual precoz.
- Un autómata de tipo Turing formado por ADN y enzimas realiza cómputos, recibe información de otras biomoléculas y emite un resultado tangible, en forma de señal o fármaco.
- Este dispositivo biomolecular demuestra la viabilidad de un nuevo tipo de computador. Podría convertirse en un instrumento médico de gran valor.

Ya en 1982, Charles Bennett, de IBM, realizó observaciones similares y propuso una hipotética máquina de Turing molecular. Interesado en la física del consumo de energía, aventuró que algún día las moléculas constituirían la base de computadores de mejor rendimiento energético [*véase* "Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo", por Charles H. Bennett y Rolf Landauer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1985].

La primera demostración real del poder computador de las moléculas llegó en 1994, cuando Leonard M. Adleman, de la Universidad de California del Sur, se sirvió de ADN para la resolución de una cuestión que resulta siempre embarazosa para los algoritmos de cálculo tradicionales: el camino hamiltoniano o problema del viajante. Consiste en hallar el trayecto más corto entre ciudades comunicadas por rutas aéreas de tal modo que se pase por cada ciudad una sola vez. Para ello creó unas moléculas de ADN que simbolizaban las ciudades y los vuelos; combinó luego billones de ellas en un tubo de ensayo. Las afinidades de emparejamiento de las moléculas ofrecieron una respuesta al cabo de pocos minutos [*véase* "Computación con ADN" por Leonard M. Adleman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1998]. Sin embargo, con los medios entonces disponibles, la extracción manual de las moléculas que representaban la solución correcta se convertía en un proceso largo. Adleman soñaba con nuevas técnicas que permitieran la construcción de un computador molecular más práctico.

En 1994, en un artículo fundamental que describía su experimento con ADN, Adleman adelantaba que las futu-

ras investigaciones en biología molecular perfeccionarían la manipulación de macromoléculas. Especulaba sobre el desarrollo de enzimas sintéticas de diseño. Imaginaba un computador de uso general: constaría de sólo una macromolécula conjugada con un grupo de enzimas de tipo ribosómico que operarían sobre ella.

Shapiro se propuso concebir un diseño lógico para ese dispositivo; funcionaría como la “especificación de operaciones” fundamental para una extensa categoría de futuros computadores moleculares. En 1999 había construido ya un modelo mecánico con piezas de plástico. Desde entonces ambos nos esforzamos en traducir ese modelo en moléculas reales.

De entrada acometeríamos la construcción de una máquina de Turing simplificada: un autómata finito. Este se limitaría a determinar si una secuencia de símbolos o letras de un alfabeto de dos caracteres, *a* y *b*, contenía un número par de *b*. Para ello se requiere sólo un autómata finito con dos estados y un “programa” que consta de cuatro reglas de transición o instrucciones. A Benenson se le ocurrió utilizar una molécula de ADN de doble hebra para representar la secuencia de entrada; las reglas de transición del autómata (el soporte lógico o “software”) tomarían la forma de otras cuatro moléculas de ADN de doble hebra cortas; dos enzimas naturales manipuladoras de ADN, *Fok*I y ligasa, desempeñarían la función del equipo físico (“hardware”).

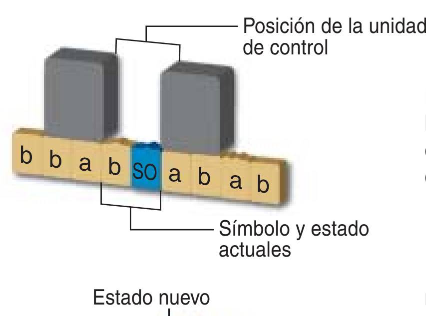
El principal problema lógico del diseño residía en la representación de los cambiantes estados intermedios de la computación, es decir, el estado interno actual del autómata y un puntero dirigido hacia el símbolo de la secuencia de entrada que se está procesando. Lo solucionamos mediante un sencillo truco: en cada etapa de la computación, el hardware enzimático digería la molécula entrante, es decir, seccionaba el símbolo que entonces se estaba procesando y exponía el siguiente. Dado que el símbolo puede seccionarse en dos sitios distintos, cada versión resultante representaría, amén del propio símbolo, uno de los dos estados posibles de la computación. (Este último elemento guardaba semejanza con un diseño de máquina de Turing molecular que un día propusiera Paul Rothemund, antiguo discípulo de Adleman.)

MODELO MOLECULAR DE MAQUINA DE TURING

Una máquina de Turing construida con biomoléculas utilizaría la capacidad natural de éstas para reconocer símbolos y engarzar monómeros entre sí o romper sus enlaces. Este modelo de plástico (*derecha*) ofrece un boceto del sistema. Las “moléculas” amarillas transportan los símbolos. Las moléculas de “software” azules indican los estados de la máquina y definen las reglas de transición. Los bloques se distinguen físicamente unos de otros por el perfil.



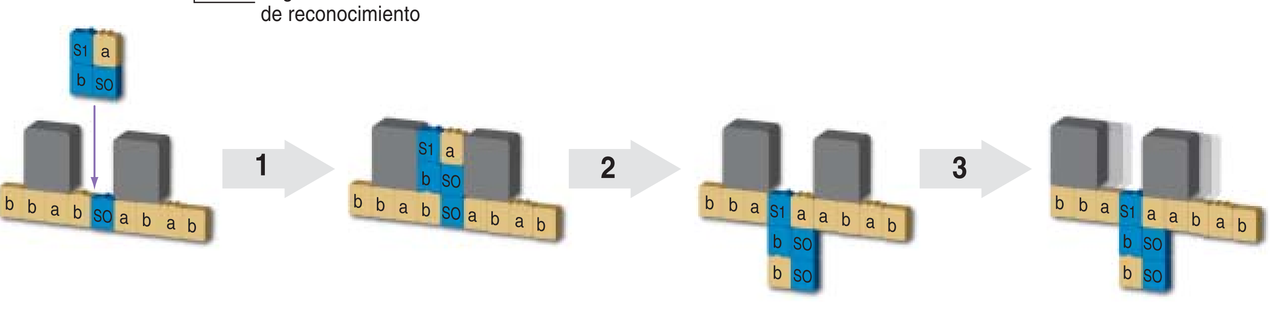
MODO DE OPERACION



La máquina opera sobre una secuencia de moléculas símbolo. En la posición centrada de la unidad de control se definen el símbolo y el estado actual de la máquina.

Estado nuevo
Complejo de transición computacional
S1 a
b S0
Símbolo nuevo
Lugar de reconocimiento

Una “transición computacional” está representada por un complejo molecular que contiene un estado y símbolo nuevos para la máquina y una posición de reconocimiento para detectar el estado y símbolo actuales. El ejemplo siguiente ilustra una regla de transición: “Si el estado actual es S0 y el símbolo actual *b*, cambiar el estado a S1 y el símbolo a *a*, y luego desplazarse una posición a la izquierda.”



Un complejo de transición computacional en libre flotación se desliza hasta encajar en la unidad de control de la máquina (*1*). El complejo molecular se une y después desplaza el símbolo y estado actuales (*2*). La unidad de control se traslada una posición a la izquierda para admitir otro complejo de transición (*3*). El proceso se repite de forma indefinida con nuevos estados y símbolos mientras las reglas de transición sean válidas.

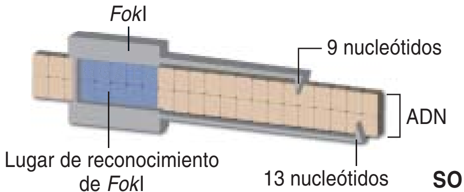
LUCY READING-IKKANDA (*ilustraciones*); INSTITUTO CIENTIFICO WEIZMANN (*fotografía*)

CONSTRUCCION DE UN AUTOMATA MOLECULAR

Puesto que los organismos vivos procesan información, los compuestos y mecanismos que los forman resultan idóneos para la computación. La molécula de ADN almacena información, codificada en un alfabeto de nucleótidos. La maquinaria celular lee y modifica esa información por medio de enzimas y otras moléculas. En este sistema operativo resultan esenciales las afinidades químicas: guían el reconocimiento y la unión de unas moléculas a otras. Construir con moléculas un dispositivo semejante al de Turing significa, pues, traducir las ideas de éste al lenguaje molecular.

Un computador conceptual sencillo, el autómata finito, avanza en una dirección única y lee una serie de símbolos, modificando su estado interno de acuerdo con unas reglas de transición. Un autómata de dos estados responderá entonces *sí* o *no* a una pregunta alternando entre los estados designados por *1* y *0*. Su estado al final del proceso de cálculo representará el resultado del cómputo.

Un autómata molecular se construye a partir de cadenas de ADN en configuraciones diversas, que desempeñan las funciones de entrada así como de “software”, y la enzima seccionadora del ADN, *Fok*I, que constituye el “hardware”. Los nucleótidos, con nombres abreviados A, C, G y T, sirven a la vez para codificar los símbolos y el estado interno de la máquina.



HARDWARE
La enzima *Fok*I (*gris*) reconoce siempre la secuencia de nucleótidos GGATG (*azul*) y secciona una cadena doble de ADN en las posiciones de 9 y 13 nucleótidos más allá de ese lugar de reconocimiento.

SOFTWARE
Las reglas de transición vienen codificadas en ocho moléculas cortas de ADN de doble hebra, que expresan el lugar de reconocimiento de *Fok*I (*azul*), seguidas por unos nucleótidos separadores (*verde*) y una cadena simple final adhesiva (*amarillo*), que se unirá a su secuencia complementaria en una molécula de entrada.

<S1,*a*> <S1,*b*> <S1,*t*>
TGGCT GCAGG GTCGG
<S0,*a*> <S0,*b*> <S0,*t*>

SIMBOLO Y ESTADO
Las combinaciones de los símbolos *a*, *b*, o *terminador* (*t*), así como los estados 1 y 0 de la máquina están representados por secuencias de cuatro nucleótidos. Según el modo en que la secuencia de cinco nucleótidos TGGCT se seccione en cuatro nucleótidos, por ejemplo, se expresará el símbolo *a* y un estado 1 o 0.

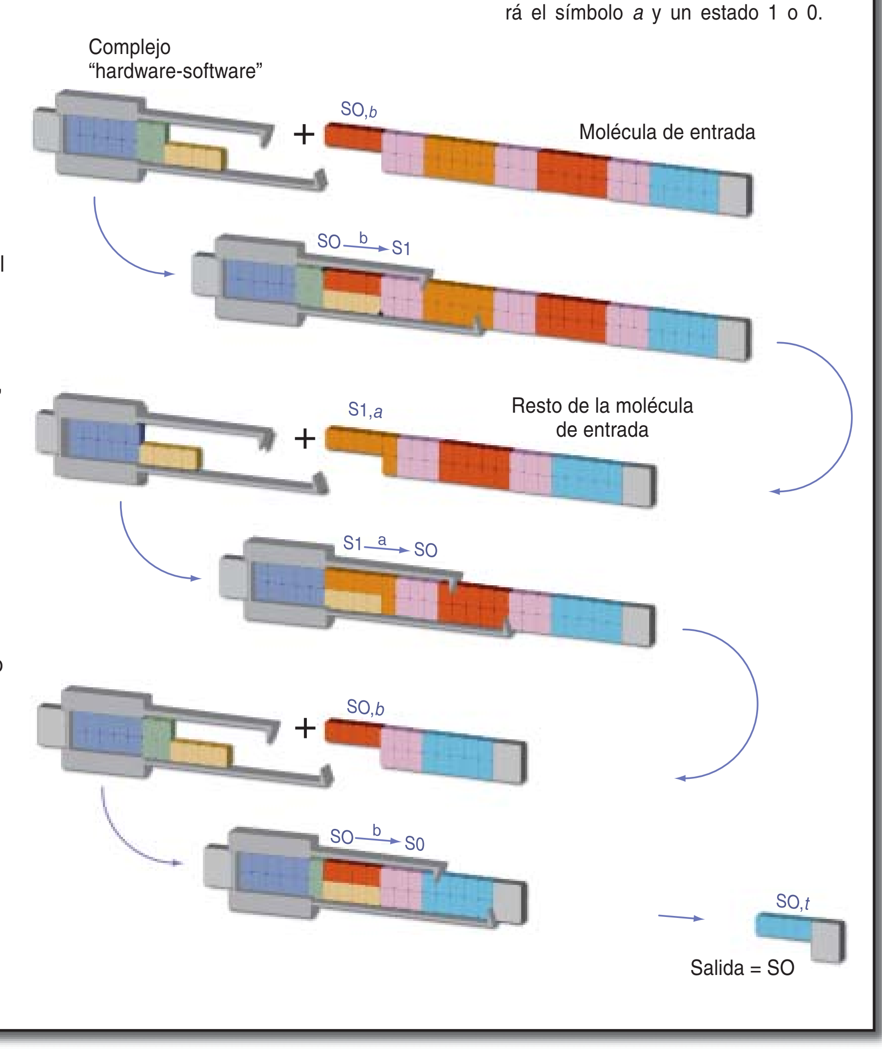
COMPUTACION AUTONOMA

Un complejo “hardware-software” reconoce su combinación estado/símbolo complementaria en la molécula de entrada. Ambas moléculas se unen para formar un complejo “hardware-software-entrada”; luego *Fok*I secciona la molécula de entrada para exponer el símbolo siguiente.

Un nuevo complejo “hardware-software” reconoce el estado y símbolo siguientes en lo que resta de la molécula de entrada.

Las reacciones continúan hasta que no haya reglas que aplicar o se revele el símbolo terminador.

En este ejemplo, las secciones efectuadas por la computación para llegar al resultado final (*extremo derecho*) han producido un símbolo terminador (S0,*t*) de cuatro nucleótidos (TCGG) que indica un estado de la máquina 0: éste es el resultado del cálculo.



LUCY READING-IKKANDA

Adviértase que el computador resultante, presentado por nuestro grupo en 2001, era autónomo: una vez colocadas las moléculas de entrada, las de software y las de hardware en una disolución intermedia dentro de un tubo de ensayo, la computación se iniciaba y proseguía de modo iterativo hasta completarse, sin intervención humana alguna.

Al ensayar este sistema nos percatamos de que, además de resolver el problema original (determinar si un símbolo se repetía un número par de veces en una secuencia), podía hacer más cosas. En un autómata finito de dos estados y dos símbolos pueden darse ocho (2^3) combinaciones de símbolo, estado y regla. Dada la modularidad de nuestro diseño, la materialización de las ocho reglas de transición posibles podría resolverse mediante ocho moléculas de transición distintas. En función del "programa" elegido (o combinación de moléculas de transición), el autómata realizaría una tarea u otra.

Ensayamos varios programas. Poco a poco refinamos nuestro sencillo autómata molecular. Incluimos en las pruebas un experimento de omisión, en el que se evaluaba el funcionamiento del autómata mediante la supresión de un componente molecular. Al suprimir la ligasa, enzima que une la molécula de software a la molécula de entrada para permitir que la otra enzima, *Fok*I, la reconozca y la seccione, la computación, pese a todo, progresaba. Descubrimos así una capacidad de *Fok*I antes ignorada: la de reconocer y seccionar ciertas secuencias de ADN, estuviesen o no unidas entre sí las dos hebras de la molécula.

La supresión de la ligasa permitió reducir en un 50 por ciento el hardware enzimático requerido. Es más, siendo la de ligamiento la única operación que consume energía, al prescindirse de la misma el computador podía operar sin suministro exterior. Por último, la supresión de la etapa de ligamiento eliminaba el consumo de moléculas de software durante la computación; éstas podían, por tanto, reciclarse.

Nuestro grupo invirtió meses de esfuerzos intensos y análisis de datos en el desarrollo de un sistema desprovisto de ligasa. Al principio, su comportamiento era pésimo: se detenía tras una o dos etapas de computación. Pero los retos bioquímico e informático nos incitaron a seguir. Con la ayuda y el asesoramiento de Rikva Adar y otros compañeros, Benenson encontró, por fin, una solución. Mediante la introducción de alteraciones pequeñas, si bien cruciales, en las secuencias de ADN que utilizaba nuestro autómata, aprovechamos la capacidad hasta entonces ignorada de *Fok*I. Logramos una gran mejora en las prestaciones del computador. Hacia 2003 teníamos ya un computador autónomo y programable, que utilizaba su molécula de entrada como única fuente de energía. En principio, procesaría cualquier molécula de entrada, cualquiera que fuere su longitud, mediante un número fijo de moléculas de hardware y software sin agotar jamás su energía.

El doctor ADN

El autómata de dos estados finitos era demasiado elemental para afrontar la resolución de problemas computacionales complejos. Lo consideraríamos una mera, aunque interesante, demostración del concepto de computador biomolecular programable y autónomo. Durante algún tiempo nos dedicamos a la construcción de autómatas de mayor refinamiento. Sin embargo, pronto nos salió al paso el problema señalado por Adleman: seguían sin aparecer las "enzimas de diseño" que él echara de menos diez años atrás.

Ninguna enzima ni complejo enzimático natural realiza reconocimientos, secciones y ligamientos, en secuencia o en tándem, con la flexibilidad necesaria para llevar a la práctica el diseño de la máquina de Turing. Deberían personalizarse las enzimas naturales u obtener enzimas sintéticas de nuevo cuño. Pero ello no es, por ahora, posible. Contábamos, pues, con una especificación de diseño lógico para una máquina de Turing biomolecular, aunque carecíamos de las piezas necesarias para su construcción.

Regresamos entonces a nuestro autómata de dos estados para averiguar si podíamos encontrarle alguna aplicación. Dentro del campo de la medicina, nos preguntamos si el dispositivo se mostraría capacitado para realizar algún tipo de diagnosis sencilla. Por ejemplo, determinar si se dan un conjunto de condiciones representativas de una enfermedad (síntomas).

Para esa tarea se necesitan sólo dos estados: a uno le llamamos *sí* y al otro *no*. El autómata iniciaría la computación en el estado *sí*; luego comprobaría, una por una, todas las condiciones de cierto listado. Mientras la condición en cuestión se detectara, se mantendría el estado *sí*; de lo contrario, el autómata se mudaría al estado *no* y persistiría en él durante el resto del proceso de computación. De ese modo, el cómputo terminaría en *sí* sólo en el caso de que fueran verídicas todas las condiciones; en cuanto no se cumpliera una condición el "diagnóstico" sería negativo.

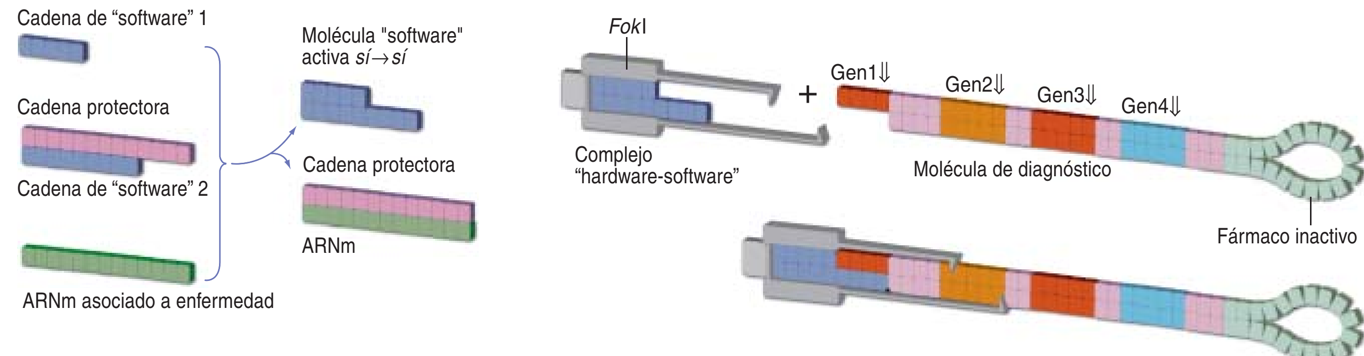
Para poner en práctica este esquema lógico debíamos encontrar la manera de conectar el autómata molecular a su entorno bioquímico; debía detectar los síntomas específicos de la enfermedad. La idea de que el medio influiría sobre las concentraciones relativas de las moléculas de transición que compiten —y, por tanto, sobre la computación— se apuntaba ya en el bosquejo de máquina de Turing molecular. La aplicación de este principio al reconocimiento de sintomatologías exigía que la presencia o ausencia de un indicador patológico determinara la concentración de moléculas de software que da testimonio del síntoma.

Numerosos tipos de cáncer, por ejemplo, se caracterizan por niveles anómalos de proteínas en la célula debidos a la expresión excesiva o insuficiente de los genes que las codifican. Cuando un gen se expresa, las enzimas del núcleo de la célula transcriben su secuencia a una versión de ARN. Luego, un ribosoma traduce este ARN mensajero (ARNm) en una cadena de aminoácidos que constituyen la proteína. Por tanto, niveles superiores o inferiores a los normales de las transcripciones específicas de ARNm constituyen un reflejo de la actividad génica.

Benenson concibió un sistema en el que algunas moléculas de transición tendrían preferencia por interactuar con esas secuencias de ARNm. A su vez, dicha interacción repercutiría en la capacidad de participar en la

DOCTOR ADN

Tras comprobar que un autómata compuesto de ADN y enzimas realiza cómputos abstractos del tipo "sí o no", los autores formularon al dispositivo una pregunta más práctica que pudiese afrontar en el interior de una célula: "¿Hay síntomas indicadores de una enfermedad?" Si la respuesta es afirmativa, el autómata emite un fármaco. El concepto básico de computación no varía respecto al diseño anterior: los complejos de moléculas de transición "software" y el "hardware" enzimático procesan los símbolos en el interior de una molécula de diagnóstico y la seccionan repetidamente para exponer los símbolos siguientes. La nueva tarea requiere, asimismo, medios para que los indicadores patológicos creen entradas para el cómputo y mecanismos para la confirmación del diagnóstico y el suministro del tratamiento.



ENTRADA

Los ARN mensajeros (ARNm) constituyen indicadores de enfermedad. Mediante la interacción con las moléculas de "software", los ARNm influyen en la molécula que finalmente se utiliza en la computación. En este ejemplo, las dos cadenas de una molécula de transición *sí→sí* empiezan separadas, una de ellas unida a una cadena protectora. Este protector, sin embargo, muestra una intensa afinidad por el ARNm asociado a la enfermedad. En presencia de ese ARNm, el protector abandonará su cadena de "software" para unirse al ARNm. Las dos cadenas de "software" separadas se unirán luego entre sí para formar una molécula de transición activa *sí→sí*.

COMPUTACION

Unos complejos formados por el "software" de la molécula de transición y el "hardware" enzimático *Fok*I procesan una serie de símbolos en el interior de la molécula de diagnóstico que representan la infraactividad (⇓) o sobreactividad (⇑) de genes específicos. El autómata inicia la computación en un estado de *sí*; en el caso de estar presentes todos los indicadores de enfermedad, produce un diagnóstico positivo. En ausencia de alguno de los síntomas, el autómata sufre la transición a *no* y permanece en ese estado.

computación que poseen las moléculas de transición. Un nivel alto de ARNm, indicativo de una enfermedad, haría que predominasen las moléculas de transición *sí → sí*, aumentando la probabilidad de que el computador detectara el síntoma. En la práctica, este sistema se aplicaría a cualquier patología asociada con niveles proteicos anómalos debidos a una actividad génica alterada; podría adaptarse también a la detección de mutaciones nocivas en las secuencias de ARNm.

Ya en posesión de un mecanismo de entrada que reconocía síntomas clínicos y del aparato lógico que había de realizar la diagnosis, pasamos a la cuestión siguiente: ¿Qué debe hacer el computador ante un diagnóstico positivo? Al principio pensamos en que emitiera una señal visible. Pero, en el mundo molecular, la emisión de una señal dista poco del paso lógico siguiente: la administración de un fármaco. Binyamin Gil, doctorando de nuestro grupo, propuso y realizó un mecanismo mediante el cual el computador liberaba una molécula de fármaco en caso de diagnóstico positivo.

Con todo, quedaban cuestiones pendientes. ¿Cómo construir un sistema fiable a partir de componentes no fiables? Este es uno de los principales escollos del diseño del equipo físico de un computador. El problema no es exclusivo de los computadores biológicos; se trata de una peculiaridad de los sistemas complejos. Hasta los dispositivos mecánicos pierden fiabilidad al disminuir su tamaño y aumentar el número de componentes. En nuestro caso, dados el carácter probabilístico de la computación y el comportamiento impreciso de los elementos biomoleculares, sería inevitable que ciertos cómputos terminaran con diagnóstico positivo, incluso en ausencia de varios o de todos los síntomas de la enfermedad (falso positivo) y viceversa (falso negativo). Por fortuna, este comportamiento estocástico se puede medir y repetir. Lo compensamos mediante un sistema de revisiones y equilibrios.

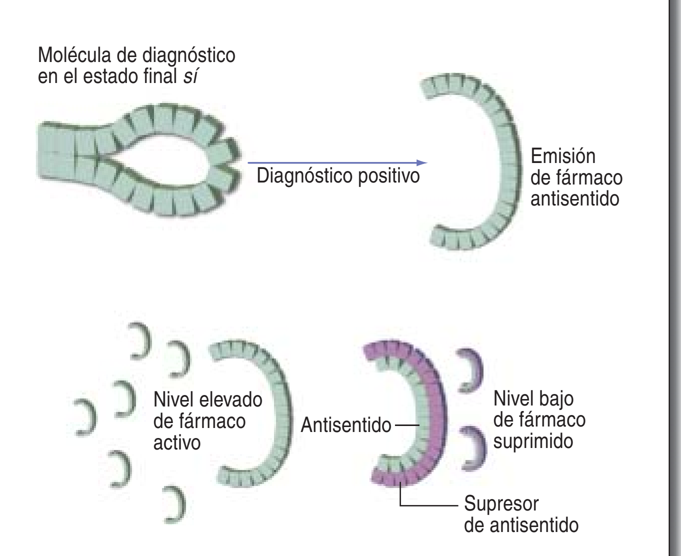
Creamos dos tipos de moléculas de cómputo: unas destinadas a liberar un fármaco cuando la computación termina en el estado *sí* y otras que liberan un supresor de ese mismo fármaco cuando la computación termina en *no*. Mediante la modificación de las concentraciones relativas de los dos tipos de moléculas controlábamos con notable precisión el umbral de certeza del diagnóstico que provocaría la administración del fármaco.

Los médicos toman decisiones de este tenor cuando sopesan el riesgo que supone para el paciente la toxicidad de un tratamiento frente a la certeza del diagnóstico. En el futuro, nuestro autómata molecular podría programarse para misiones clínicas que requieran la emisión de juicios semejantes.

Una nueva especie de computadores

Nuestro sencillo vehículo nos había llevado mucho más lejos de lo que esperábamos y en una dirección distinta de la que habíamos imaginado. Hasta el momento, el computador biomolecular había funcionado sólo en el tubo de ensayo. Para simular un entorno biológico celular

LUCY READING-IKKANDA



SALIDA

Tras un diagnóstico positivo, se secciona la molécula de diagnóstico para emitir el tratamiento: una molécula de ADN antisentido de cadena simple (*arriba*). Con el fin de compensar los errores de diagnóstico, se crearon también versiones negativas de las moléculas de diagnóstico para realizar computaciones paralelas. En ausencia de los indicadores de enfermedad, los autómatas en cuestión emiten un supresor del fármaco. Cuando computan al mismo tiempo miles de moléculas de diagnóstico de ambos tipos, se considerará correcto el diagnóstico de la mayoría; las moléculas antisentido sobrepasarán en número a sus supresores (*abajo*), o bien a la inversa.

se añadieron moléculas de ARN y ADN en concentraciones diversas; luego se introdujeron en el tubo todos los componentes del autómata. Nos proponemos ahora hacerlo funcionar en el interior de una célula, para que allí compute y se relacione con el entorno.

Introducir el autómata en la célula supone ya un reto. La mayoría de los sistemas de administración se han diseñado para ADN o proteínas. Dado que nuestro computador contiene ambos elementos, estamos buscando procedimientos para administrar estas moléculas en tándem. Necesitamos también un sistema de vigilancia: debe realizarse un seguimiento del proceso de cómputo, con miras a confirmar que el autómata trabaja sin que la actividad celular perturbe la computación, ni los componentes del computador influyan de un modo no previsto en el comportamiento de la célula. Asimismo, exploramos formas alternativas de relación entre el autómata y su entorno. De acuerdo con investigaciones oncológicas recientes, los mejores indicadores de enfermedad podrían ser los microARN, moléculas de escaso tamaño que desempeñan importantes funciones reguladoras en el interior de las células. En ese contexto, estamos rediseñando nuestro computador para que "dialogue" con microARN y no con ARN mensajero.

Aunque nos hallamos todavía lejos de poder aplicar nuestro dispositivo en el interior de células, y mucho menos en un organismo, contamos con la confirmación del concepto. Mediante la asociación directa de los síntomas bioquímicos de la enfermedad con las etapas básicas de una computación molecular, demostramos *in vitro* que un computador molecular autónomo se comunica con sistemas biológicos y realiza valoraciones con significado biológico. El mecanismo de entrada reconoce el entorno en que opera, el mecanismo de computación lo analiza y el mecanismo de salida influye sobre el entorno en función del resultado de su análisis.

En resumen, nuestro autómata ofrece la promesa de una interacción directa entre los computadores biomoleculares y el mundo bioquímico. Retrotrae además el círculo entero de la informática a la visión original de Turing. Las primeras máquinas computadoras tuvieron que alejarse de ese concepto para adaptarse a las propiedades de los componentes electrónicos. Sólo al cabo de varios decenios, cuando los biólogos moleculares empezaron a desvelar las operaciones de las minúsculas máquinas que habitan en el interior de las células, los informáticos reconocieron un sistema que guardaba semejanza con el concepto abstracto de computación enunciado por Turing.

Con ello no queremos decir que las moléculas vayan a sustituir a las máquinas electrónicas en todas las tareas de computación. Las dos especies de computadores tienen capacidades distintas y coexistirían sin dificultad. Puesto que las biomoléculas gozan de acceso directo a los datos codificados en otras biomoléculas, resultan intrínsecamente compatibles con los sistemas vivos de una forma que nunca estará al alcance de los computadores electrónicos. Nuestro trabajo pone de relieve la importancia fundamental de una nueva especie informática, el computador biomolecular, que demostrará su utilidad en una extensa gama de aplicaciones.

Los autores

Ehud Shapiro y **Yaakov Benenson** comenzaron a colaborar en la construcción de autómatas moleculares en 1999. Shapiro es profesor de los departamentos de informática y bioquímica del Instituto Weizmann de Ciencias en Rehoboth, donde desempeña la cátedra Harry Weinrebe. A él debemos el primer diseño de un modelo de máquina de Turing molecular en 1998. Benenson preparó su doctorado con Shapiro. Hoy trabaja en el Centro Bauer para Investigaciones Genómicas de la Universidad de Harvard.

Bibliografía complementaria

A MECHANICAL TURING MACHINE: BLUEPRINT FOR A BIOMOLECULAR COMPUTER. Presentado por Ehud Shapiro en la 5ª Reunión Internacional sobre Computadores basados en ADN, Instituto de Tecnología de Massachusetts, 14-15 de junio, 1999.

PROGRAMMABLE AND AUTONOMOUS COMPUTING MACHINE MADE OF BIOMOLECULES. Y. Benenson, T. Paz-Elizur, R. Adar, E. Keinan, Z. Livneh y E. Shapiro en *Nature*, vol. 414, págs. 430-434; 22 de noviembre, 2001.

AN AUTONOMOUS MOLECULAR COMPUTER FOR LOGICAL CONTROL OF GENE EXPRESSION. Y. Benenson, B. Gil, U. Ben-Dor, R. Adar y E. Shapiro en *Nature*, vol. 429, págs. 423-429; 27 de mayo, 2004.

A través del estudio de la formación del mayor río del mundo nos es dado conocer las razones de la extraordinaria abundancia de vida vegetal y animal en la pluviselva amazónica



El nacimiento del Amazonas

Carina Hoorn

Cuando se observa el río Amazonas desde el aire, se advierte un paisaje dominado por el agua, que se extiende más allá del vigoroso canal principal. El río, que fluye desde las tierras altas de la vertiente pacífica de Perú hasta la costa atlántica de Brasil, a unos 6500 kilómetros de distancia, experimenta crecidas que inundan vastos tramos de selva durante la estación de las lluvias; a lo largo del año, miles de lagos salpican esas llanuras de inundación.

En total, el río da vida a 2,5 millones de kilómetros cuadrados de la pluviselva más diversa de la Tierra. Sin embargo, hasta hace poco no se conocía la antigüedad de tan íntima relación entre el río y el bosque. La inaccesibilidad de esta región remota, la Amazonía, convertía las viejas teorías sobre la formación del río y la selva circundante en meras especulaciones.

En los últimos 15 años, nuevos estudios sobre los registros rocoso y fósil han permitido pergeñar una imagen más completa de la historia amazónica. Los descubrimientos sugieren que el nacimiento del río constituyó un proceso complejo que duró millones de años; el desarrollo del río habría ejercido una influencia determinante en la evolución de la flora y la fauna endémicas. Abundan quienes proponen que el río incipiente alimentaba numerosos lagos interconectados en la parte media del continente, antes de que se abriera un nexo directo con el océano Atlántico; este humedal dinámico ofreció las condiciones óptimas para el florecimiento de organismos

RICARDO AZOURY *Corbis*



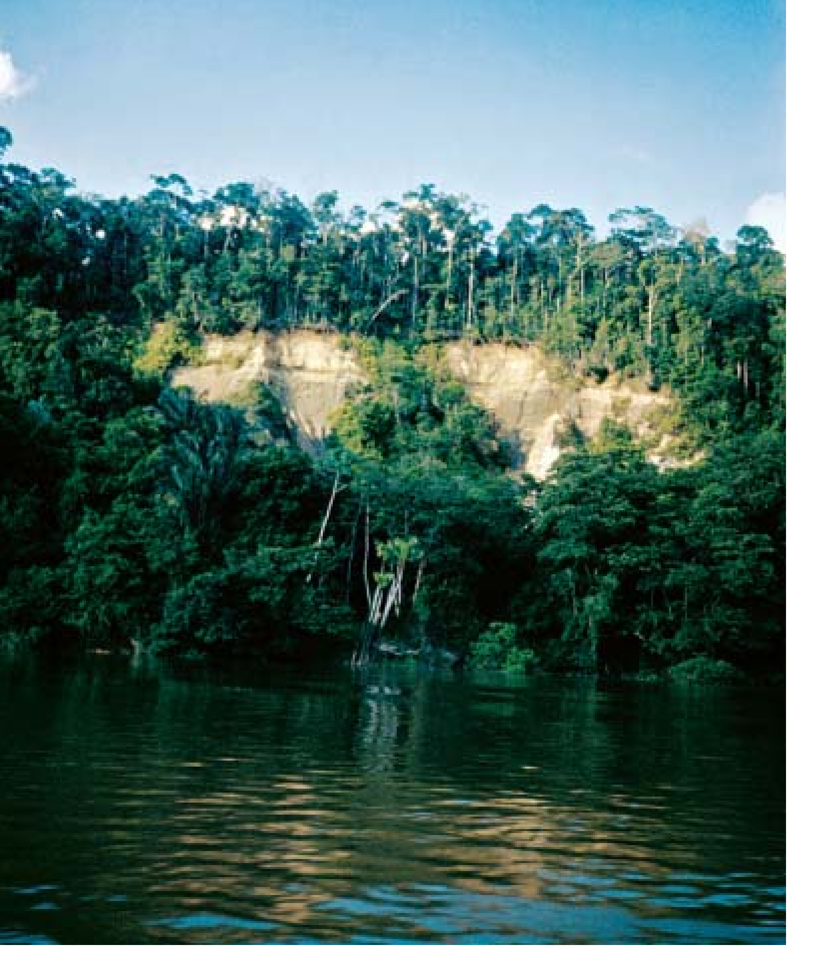
1. ISLAS DE JUNGLA del archipiélago de Anavilhana, en el río Negro, cerca de Manaus, Brasil. Este debió de ser el aspecto de los extensos humedales que, se supone, inundaban gran parte de la Amazonía hace entre 16 y 10 millones de años.

acuáticos y continentales mucho antes de lo que se creía. Las nuevas interpretaciones explican por qué animales oceánicos, piénsese en los delfines, medran hoy en los ríos y lagos interiores de la Amazonía.

Sedimentos reveladores

Comprender de qué forma y cuándo nació el Amazonas resulta esencial para esclarecer de qué modo su curso modeló la evolución de la vida en la Amazonía. Hasta los años noventa, los geólogos sabían sólo que determinados movimientos de la corteza terrestre forjaron los Andes y cumbres elevadas en otras regiones (Himalaya y los Alpes, entre ellas) hace entre unos 23 y cinco millones de años, durante el Mioceno. Estos acontecimientos desencadenaron el nacimiento de nuevos ríos y alteraron el curso de los ya existentes en Europa y Asia. Se suponía que Sudamérica no debió ser una excepción, pero se desconocía la naturaleza y el calendario de dichos cambios.

Cuando empecé a explorar ese misterio en 1988, sospechaba que los mejores registros del ambiente primitivo de la Amazonía se hallarían en los grandes depósitos de fango, arena y detritus vegetales que se almacenan en el cauce que le lleva al Atlántico. Pero el acceso a estos sedimentos (desde hace tiempo solidificados en argilitas, areniscas y otras rocas) planteaba dificultades importantes. Una jungla que se extiende por nueve países con legislaciones distintas no cede fácilmente



2. FARALLONES AMARILLENTOS a lo largo del río Caquetá, Colombia. Emergen de la densa pluviselva sólo en raras ocasiones. Estas rocas antiguas encierran pistas sobre los primeros días de la Amazonía.

CORTESIA DE CARINA HOORN, REIMPRESO DE "FLUVIAL PALAEOENVIRONMENTS IN THE INTRACRATONIC AMAZONAS BASIN (MIOCENO TEMPRANO-MIOCENO TEMPRANO MEDIO, COLOMBIA)", POR CARINA HOORN, EN *PALAEOGEOGRAPHY, PALAEOCLIMATOLOGY, PALAEOECOLOGY*, VOL. 109, N.º 1; MAYO DE 1994. © ELSEVIER

sus secretos. Además, las rocas que forman el canal no suelen aflorar por encima del suelo, sino a lo largo de afluentes casi inaccesibles. Tienden a estar cubiertas por vegetación densa.

En los cientos de kilómetros de cursos de agua que inspeccionamos en Colombia, Perú y Brasil, encontramos unas docenas escasas de afloramientos rocosos de cierta entidad. Sólo pudimos llegar a los estratos superiores de la potente formación rocosa, que en algunos lugares se extiende hasta casi un kilómetro bajo la superficie.

De acuerdo con los resultados del trabajo de campo inicial, no existía el Amazonas antes del Mioceno Medio, hace unos 16 millones de años. La mayoría de las rocas datadas de épocas anteriores contenían arcillas rojizas y arena de cuarzo blanco, formadas a partir de la erosión de granitos y de otras rocas de colores claros en el interior del continente. Esta composición indicaba que los primeros cursos de agua de la región se originaron en el corazón de la Amazonía. Inferí (y otros investigadores lo confirmaron después) que durante el Mioceno Temprano había ríos que fluían hacia el noroeste, desde colinas bajas del interior del continente; algunos de ellos desembocaban en el mar Caribe.

Resumen/Amazonía primitiva

- Las teorías clásicas suponían que un mar somero cubrió la Amazonía durante una parte extensa de su historia. La biodiversidad actual de la pluviselva habría surgido de una evolución reciente.
- De acuerdo con la investigación reciente, la pluviselva era ya floreciente por la época en que se formó el río Amazonas, hace unos 16 millones de años.
- La evolución de la selva moderna habría recibido una poderosa influencia de la larga y espectacular formación del Amazonas, cuyo curso ininterrumpido a través del continente no se inició hasta hace unos 10 millones de años.

El paisaje amazónico se alteró poco después, cuando un episodio violento de actividad tectónica levantó los Andes nororientales. En las rocas de hace 16 millones de años no hay sedimentos rojos ni blancos. Sí encontramos en ellas, alternándose, arcillas azul turquesa, grises y verdes, areniscas pardas y lignito (material vegetal fósil). Resultaba obvio que las partículas oscuras de fango y arena procedían de una fuente distinta de los granitos de color claro. Los patrones estratificados de los sedimentos fósiles indicaban que el agua que los depositó ya no fluía hacia el norte, sino hacia el este. En mi opinión, las montañas que se elevaron al oeste provocaron el cambio en la pauta de drenaje, dirigiendo el agua al este, hacia el Atlántico.

La idea recibió el respaldo de análisis posteriores del sedimento. Realizados en la Universidad de Wageningen, demostraron que los granos de arena pardos correspondían, en cuantía significativa, a fragmentos de los esquistos y otras rocas oscuras que empezaron a erosionarse al par que se empinaban unos Andes recién nacidos. Más aún, algunos de los granos de polen y esporas hallados en las arcillas y los lignitos procedían de coníferas y helechos arborescentes que habrían crecido sólo en las altitudes altas de una cordillera. Este polen contrastaba con el de los sedimentos más antiguos del Mioceno, que procedían de plantas exclusivas de tierra adentro y bajas altitudes. Los testigos perforados de rocas miocénicas de Brasil, que proporcionaron la única secuencia completa del cambio desde arcillas rojizas a sedimentos azules y pardos, confirmaron mis hipótesis.

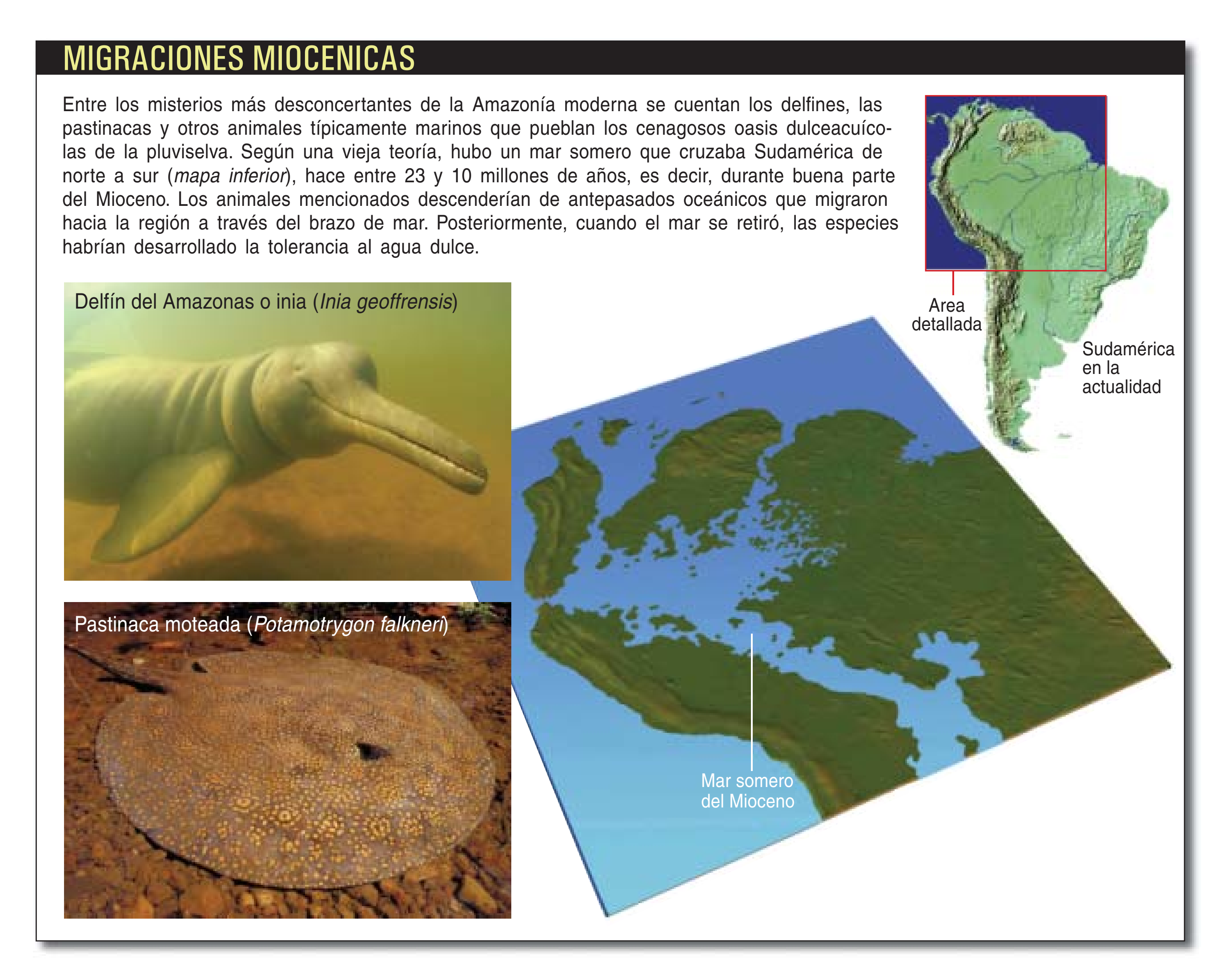
Contábamos, por fin, con pruebas que situaban en el tiempo la formación del Amazonas. Pero pronto se descubriría que el río no alcanzó su magnitud hasta mucho más tarde. En 1997, el equipo que dirigía David M. Dobson, hoy en el Colegio Guilford de Greensboro, descubrió que los granos de arena andina que yo había encontrado en la Amazonía empezaron a acumularse a lo largo de la costa brasileña hace sólo unos 10 millones de años. Este lapso de tiempo significa que el río tardó al menos seis millones de años en convertirse en el actual sistema de drenaje transcontinental, en trabada conexión. La investigación de los cambios geológicos desarrollados en tal período de transición aclara los orígenes de la fauna actual del río.

La hipótesis de un mar somero

La teoría imperante sobre la Amazonía miocénica ha venido declarando que, durante buena parte de aquella época, la región estaba cubierta por un mar somero. El descubrimiento de que el río Amazonas tardó millones de

MIGRACIONES MIOCENICAS

Entre los misterios más desconcertantes de la Amazonía moderna se cuentan los delfines, las pastinacas y otros animales típicamente marinos que pueblan los cenagosos oasis dulceacuícolas de la pluviselva. Según una vieja teoría, hubo un mar somero que cruzaba Sudamérica de norte a sur (*mapa inferior*), hace entre 23 y 10 millones de años, es decir, durante buena parte del Mioceno. Los animales mencionados descenderían de antepasados oceánicos que migraron hacia la región a través del brazo de mar. Posteriormente, cuando el mar se retiró, las especies habrían desarrollado la tolerancia al agua dulce.



FLIP NICKLIN *Minden Pictures (delfín)*; DANTE FENOLIO *Photo Researchers, Inc. (raya)*; RON MILLER *(mapas)*

años en madurar no contradecía tal hipótesis, defendida durante decenios, pues dejaba abierta la posibilidad de que el mar en cuestión impidiera el paso del río incipiente hacia el Atlántico.

Para los defensores de esa tesis, una conexión prolongada con el océano abierto explicaría la forma en que delfines, manatíes, pastinacas y otros animales marinos se abrieron paso hasta el corazón del continente. Posteriormente, cuando el mar se retiró, habrían desarrollado la tolerancia al agua dulce; por ello sus descendientes siguen medrando en los oasis acuáticos de la selva. La investigación llevada a cabo en la región austral de Sudamérica ha aportado pruebas de la existencia de condiciones marinas someras en el interior de Argentina durante el Mioceno.

Con tal gavilla de pruebas resultaba atractiva la hipótesis del mar somero. Pero, por lo que hemos descubierto, parece poco probable que una tal conexión dominara el paisaje durante mucho tiempo. En nuestra opinión, las muestras de rocas del Mioceno Medio que recolecté, que abarcan un período que va desde hace 16 hasta hace 10 millones de años, constituyen reliquias de un ambiente dulceacuícola.

Los estratos rocosos del Mioceno Medio destacan por su periodicidad. Al principio, pensé que este patrón se habría generado mediante la deposición de distintos tipos de sedimentos en estaciones alternativamente secas y húmedas, a lo largo de los años, según es típico de los humedales alimentados por ríos pequeños. Durante la estación seca, las partículas de suelo y el material vegetal se habrían depositado lentamente en el fondo de lagos someros y pantanos, terminando por formar las arcillas azules y el lignito. Durante la estación lluviosa, los ríos henchidos que fluían desde las tierras altas del oeste —quizás incluso el incipiente Amazonas— habrían arrastrado las arenas pardas; además, los minerales típicos de los altos andinos aparecían sólo en las capas de arenisca.

Pero la periodicidad de los depósitos admite otras interpretaciones. Para el grupo dirigido por Matti Räsänen, de la Universidad de Turku, los tipos alternos de sedimentos registran las oscilaciones de mareas oceánicas, que habrían convertido las líneas de costa en el tipo de mar somero o estuario que cubría, así creen, la Amazonía en aquella época. Las mareas crecientes habrían aportado las arenas; el fango y la materia vegetal se habrían depositado cuando las mareas se retiraban. Conviene, no obstante, advertir que en los grandes lagos de agua dulce se produce también el fenómeno de las mareas.

Los indicios más sólidos del predominio del agua dulce sobre el paisaje del Mioceno Medio proceden de los abundantes fósiles enterrados en los afloramientos. Cuando Frank P. Wesselingh, del Museo de Historia

Notas de campo

Investigar en la Amazonía es cualquier cosa menos fácil. Doy de ello fe con mis primeras incursiones en la selva, allá por 1988. A través de la búsqueda y el análisis de rocas sedimentarias enterradas bajo el grueso estrato de suelo y vegetación, me proponía dilucidar la evolución geológica de la región.

Puesto que las rocas que me interesaban, se hallaban separadas por cientos de kilómetros no era raro que terminara por adentrarme, semanas enteras, en las orillas de los tributarios del Amazonas. Mi campamento base se encontraba en la antigua prisión de Araracuara, tan remota que se creía que los prisioneros que escapaban no tenían ninguna probabilidad de sobrevivir. Por suerte contaba con la colaboración de un ayudante indio, Aníbal Matapi.



HOORN (*derecha*) y su ayudante, Aníbal Matapi.

Una de las expediciones comenzó en el río Caquetá, en Colombia. Navegamos durante muchas horas. Para mí, todos los recodos del río tenían el mismo aspecto. Aníbal, en cambio, que había pasado toda su vida en esta parte de la jungla, sabía exactamente dónde nos hallábamos. Nos detuvimos junto a una casa abandonada; instalamos las hamacas para pasar la noche. Al día siguiente buscaríamos afloramientos rocosos cerca del río Apaporis, en una zona separada del Caquetá por rápidos temibles. Las aguas eran demasiado turbulentas para nuestra barca; la dejaríamos atrás y nos desplazaríamos por tierra, cargando con el motor.

Cruzamos las colinas hacia el Apaporis; pedimos prestada una pequeña barca a los indios locales. Otro grupo nos albergó durante los días siguientes, mientras seguíamos buscando los preciados afloramientos. Al principio nuestros anfitriones se mostraron amistosos; pero su hospitalidad no duró mucho. El motivo: otra persona no india se hallaba de visita en la tribu. Sospechamos que se estaba escondiendo. Debía tratarse de un miembro de la guerrilla colombiana, que por aquella época operaba en la región. Terminada la recolección de varios kilogramos de arcillas negras y otros sedimentos antiguos, abandonamos, aliviados, el poblado. De todas las expediciones, la del Apaporis fue la más arriesgada.

Natural de Leiden, me acompañó a Colombia en 1991, desenterró una población muy variopinta de moluscos fósiles incrustados en las rocas del Mioceno Medio. A partir de trabajos previos de C. Patrick Nuttall, a la sazón en el Museo Británico de Londres, la investigación taxonómica pormenorizada de especies tan dispares de moluscos que hizo Wesselingh reveló que en su mayoría los moluscos estaban adaptados a lagos de agua dulce; sólo unas pocas especies habrían sobrevivido en un ambiente totalmente marino. (Los especímenes representaban unos siete millones de años y docenas de localidades de toda la Amazonía.) Un mar interior y somero de duración prolongada como el que planteaba la hipótesis de Räsänen habría impedido la adaptación durante la inundación. A su vez, un mar salado hubiera eliminado cualquier especie dulceacuícola que hubiera evolucionado antes de la existencia del mismo.

En 1998, Hubert B. Vonhof, de la Universidad Libre de Amsterdam, y Wesselingh, con sus grupos respectivos, llegaron a la misma conclusión a través del estudio de las rúbricas químicas de las conchas de los moluscos. Las conchas de los moluscos crecen a partir de carbono, oxígeno, estroncio y otros elementos disueltos en el agua circundante. De ahí que la composición de las bandas de crecimiento de una concha opere como un registro de la química del agua durante el tiempo en que vivió el molusco. Además, puesto que la relación de isótopos (átomos del mismo elemento químico con distinto número de neutrones) de estroncio para el agua de mar difiere de la relación isotópica para el agua dulce, tales razones constituyen un indicador de la salinidad.

Para sorpresa de muchos, las rúbricas del estroncio se mostraban constantes a lo largo del amplio abanico temporal y geográfico de los moluscos abordados; ello indicaba no sólo que su hábitat era predominantemente dulceacuícola, sino también que el humedal constituía una masa importante de agua, interconectada. De acuerdo con las estimaciones actuales, cubriría alrededor de 1,1 millones de kilómetros cuadrados; su tamaño duplicaba el de los Grandes Lagos de Norteamérica. De ser así, correspondería a uno de los mayores y más persistentes sistemas lacustres conocidos.

Invasiones fugaces

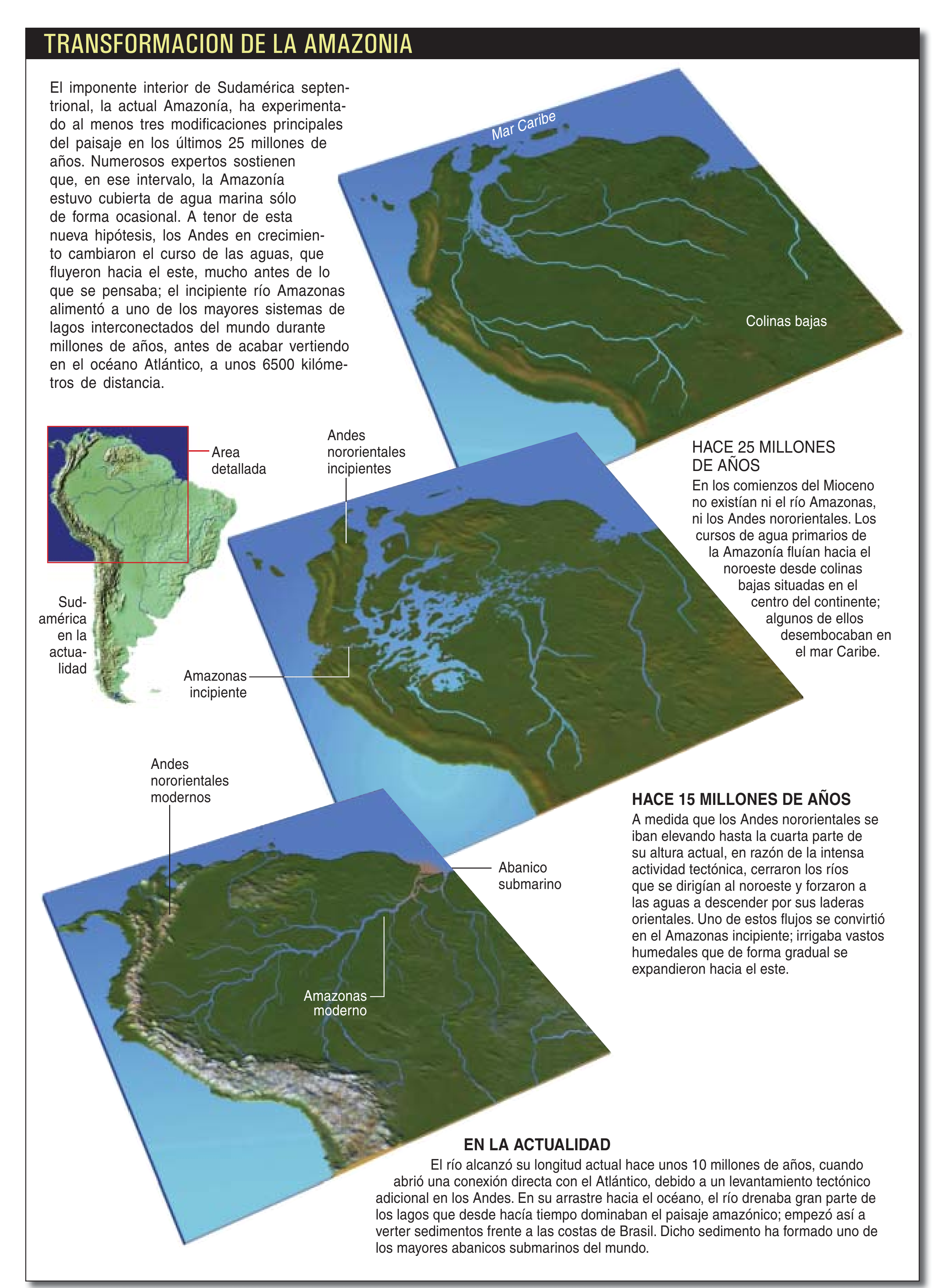
A pesar de los numerosos indicios en contra de la presencia prolongada de un brazo de mar en la Amazonía miocénica, las trazas de estroncio de los moluscos revelaron que ese enorme sistema lacustre experimentó aumentos de salinidad ocasionales. En el Mioceno el nivel del mar se encontraba por encima del actual, quizá porque un mar Caribe en expansión avanzó hacia el sur por un estrecho paso interior. De hecho, las plantas y animales fósiles han confirmado la existencia de conexiones efímeras con el océano. En mis muestras de rocas aparecieron microorganismos marinos y polen de mangles (árboles que medran en agua de mar), pero sólo en raras ocasiones y durante cortos intervalos de tiempo. En su conjunto, las pruebas indican que la Amazonía sufrió inundaciones al menos dos veces cuando existía el humedal extenso, hace entre 16 y 10 millones de años.

Se estima que las incursiones marinas duraron miles de años, no millones, en cada ocasión. Aunque nunca

S. B. KROONENBERG

TRANSFORMACION DE LA AMAZONIA

El imponente interior de Sudamérica septentrional, la actual Amazonía, ha experimentado al menos tres modificaciones principales del paisaje en los últimos 25 millones de años. Numerosos expertos sostienen que, en ese intervalo, la Amazonía estuvo cubierta de agua marina sólo de forma ocasional. A tenor de esta nueva hipótesis, los Andes en crecimiento cambiaron el curso de las aguas, que fluyeron hacia el este, mucho antes de lo que se pensaba; el incipiente río Amazonas alimentó a uno de los mayores sistemas de lagos interconectados del mundo durante millones de años, antes de acabar vertiendo en el océano Atlántico, a unos 6500 kilómetros de distancia.



HACE 25 MILLONES DE AÑOS
En los comienzos del Mioceno no existían ni el río Amazonas, ni los Andes nororientales. Los cursos de agua primarios de la Amazonía fluían hacia el noroeste desde colinas bajas situadas en el centro del continente; algunos de ellos desembocaban en el mar Caribe.

HACE 15 MILLONES DE AÑOS
A medida que los Andes nororientales se iban elevando hasta la cuarta parte de su altura actual, en razón de la intensa actividad tectónica, cerraron los ríos que se dirigían al noroeste y forzaron a las aguas a descender por sus laderas orientales. Uno de estos flujos se convirtió en el Amazonas incipiente; irrigaba vastos humedales que de forma gradual se expandieron hacia el este.

EN LA ACTUALIDAD
El río alcanzó su longitud actual hace unos 10 millones de años, cuando abrió una conexión directa con el Atlántico, debido a un levantamiento tectónico adicional en los Andes. En su arrastre hacia el océano, el río drenaba gran parte de los lagos que desde hacía tiempo dominaban el paisaje amazónico; empezó así a verter sedimentos frente a las costas de Brasil. Dicho sedimento ha formado uno de los mayores abanicos submarinos del mundo.

RON MILLER

Las pruebas enterradas en rocas de entre 16 y 10 millones de años de antigüedad (estratos sedimentarios, granos de polen y moluscos fósiles) sugieren que las condiciones salinas dominaron la Amazonía sólo en raras ocasiones durante la parte media del Mioceno. En cambio, las aguas dulces fueron la norma.



ESTRATOS RITMICOS de sedimentos del Mioceno Medio, hoy solidificados en rocas. Suelen depositarse en humedales someros alimentados por pequeños ríos. Durante las estaciones lluviosas, los ríos henchidos descargan copiosas partículas de arena (*estratos finos y ocres*) sobre el fondo de los lagos. Durante las épocas más secas, abundan más las partículas de fango; al sedimentar lentamente, forman depósitos de arcilla (*capas azules*) sobre la arena.





GRANOS DE POLEN abundantes en las rocas amazónicas del Mioceno Medio. Proceden de plantas fanerógamas de la familia de las Bombacáceas (*izquierda*) y las Cesalpinoideas (*derecha*). Crecen casi exclusivamente a lo largo de las riberas fluviales. La escasa presencia de polen de mangles y de microorganismos marinos en los mismos sedimentos confirma que el agua salada invadió la región sólo de una manera esporádica.





MOLUSCOS DULCEACUICOLAS, como *Pachydon* (*izquierda*) y *Sioliella* (*derecha*), constituían la inmensa mayoría de moluscos del Mioceno Medio descubiertos en docenas de localidades de toda la Amazonía; sólo algunas de las especies encontradas allí habrían sobrevivido en agua salada.

impulsaron el aumento de la salinidad del lago hasta los niveles del océano abierto, habrían proporcionado a la fauna oceánica un medio para penetrar en el corazón de la Amazonía. Sin embargo, las investigaciones sobre la evolución de determinadas especies conducen a la conclusión de que la última conexión marina de importancia se interrumpió cuando el Amazonas era todavía un río incipiente, mucho antes que el humedal diera paso al río transcontinental de hoy. A este respecto, los estudios moleculares realizados por Nathan R. Lovejoy, de la Universidad de Toronto en Scarborough, revelan que las pastinacas del Amazonas, estrechamente emparentadas con las del mar Caribe, migraron hacia el interior del continente antes de hace unos 16 millones de años.

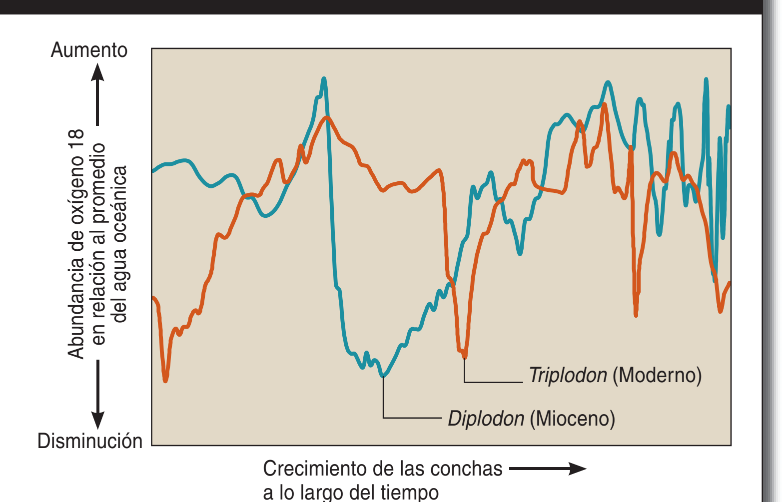
En trabajos con delfines se cosecharon resultados semejantes. En 2000, el equipo que encabeza Insa Cassens, de la Universidad Libre de Bruselas, dedujo que los delfines fluviales rosados, las inias, butos o bufeos de la Amazonía actual constituían una reliquia de estirpes de delfines marinos comunes en el Mioceno Temprano, si bien se extinguieron poco después; de lo que se infiere que los que existen en la actualidad corresponden a una forma que se adaptó al medio dulceacuícola. Eulalia Banguera Hinestroza, de la Universidad del Valle en Colombia, distinguió en fecha reciente dos grupos de delfines *Inia* genéticamente distintos, uno en el Amazonas y el otro en Bolivia, señal de que estos grupos estuvieron separados durante un tiempo considerable. Semejante separación no habría tenido lugar mientras un brazo de mar mantuviera en conexión ambas regiones.

Antigüedad de la pluviselva

Las pruebas crecientes de que la cuenca del Amazonas miocénica guardaba mayor semejanza con un lago que con un mar obligaron a reconsiderar la historia de la pluviselva. Según una de las teorías predominantes sobre el origen de la diversidad amazónica, ésta surgió en el marco de las edades de hielo que acontecieron en el transcurso del último millón de años. La aparición de condiciones áridas semejantes a las que las glaciaciones confirieron a Sudamérica septentrional habría facilitado el confinamiento de una pluviselva primitiva en hábitats pequeños, discretos o sin conexión. Muchos biólogos evolutivos sostienen que tal separación es necesaria para la generación de riqueza biológica: cuando un hábitat que antaño era extenso se parcela en fracciones, reza la teoría, las poblaciones adyacentes de una especie determinada dejan de entrecruzarse; con el transcurso del tiempo, este aislamiento reproductor favorece la divergencia genética de una población respecto de las demás y aparece una nueva especie. Cuando las tierras vuelven a conectarse en tiempos más cálidos, las especies permanecen distintas, aunque medren en territorios superpuestos.

Mas, también aquí, los nuevos descubrimientos nos hablan de un pasado distinto. Las mismas pruebas que esclarecieron el ecosistema lacustre sugieren que muchas asociaciones modernas de plantas y animales amazónicos prosperaban ya hace millones de años. Así, el conjunto de muestras de polen que se extrajo de las rocas del Mioceno representaba una sorprendente diversidad de vegetación. Se identificaron 214 especies (muchas más se excluyeron de los recuentos al hallarse una única

CORTESIA DE CARINA HOORN (*sedimento*); MARTIN KONERT *Universidad Libre de Amsterdam* Y CARINA HOORN (*granos de polen*); FRANK P. WESSELINGH *Museo de Historia Natural (Naturalis), Leiden* (*moluscos*)



EL OXIGENO DE LAS CONCHAS DE MOLUSCOS como las de *Diplodon* (*curva azul*), de 16 millones de años de antigüedad, sugiere que los animales vivieron en un lago de llanura de inundación tropical. Las bandas de crecimiento (las capas de la concha que los moluscos construyen a partir de sustancias disueltas en el agua circundante) de *Diplodon* muestran un patrón alternante de enriquecimiento y depleción de un isótopo raro del oxígeno, el oxígeno 18. Estos patrones alternantes, que se encuentran también en el molusco amazónico moderno *Triplodon* (*curva roja*), significan que los animales se hallaron sometidos a las estaciones húmeda y seca típicas de las pluviselvas tropicales; las curvas habrían sido más aplanadas si los moluscos hubieran vivido, por ejemplo, en un mar salado.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: RON J. G. KAANDORP *Universidad Libre de Amsterdam*

presencia). En su mayoría, las muestras de polen más abundantes correspondían a plantas fanerógamas comunes en las riberas fluviales; su variedad evocaba la que nos ofrece hoy la selva. En cualquier caso, la inundación prolongada con agua salada, tesis propuesta por otros, hubiera limitado en buena medida las posibilidades de que tales especies terrestres predominaran en la región hasta bastante después, una observación que pone en cuestión un mar duradero en la Amazonía.

Una investigación reciente sobre moluscos consolida los resultados palinológicos. El trabajo indica que el clima del Mioceno podría haber sustentado una pluviselva diversa. Ron J. G. Kaandorp estudió las bandas de crecimiento de conchas de moluscos de hace unos 16 millones de años; esta vez analizó las trazas químicas del oxígeno, un elemento que varía en consonancia con la abundancia de precipitaciones. Las bandas de crecimiento mostraron un patrón alternante de isótopos de oxígeno, de notable parecido al que presentan los moluscos amazónicos actuales. En las conchas modernas, las bandas alternas corresponden al producto de las estaciones húmeda y seca de las que la selva depende. Aunque el planeta era más cálido durante el Mioceno, la presencia de señales de oxígeno casi idénticas en los moluscos primitivos sugiere que la variación climática necesaria para mantener un ecosistema de pluviselva se daba ya cuando éstos vivían, mucho antes de las edades de hielo del último millón de años.

Explosión de especies

En vista de las nuevas pruebas, los expertos van admitiendo que el humedal miocénico de la Amazonía constituyó una cuna de especiación en la que tuvo lugar una explosión evolutiva. La elevación de los Andes fue el detonante: desencadenó el nacimiento del río Amazonas (entre otros), que luego alimentó un extenso humedal que dominó la Amazonía durante casi siete millones de años.

Los invasores marinos se introdujeron en la región en algunas ocasiones. El ambiente dulceacuícola de los lagos interconectados, posteriores a la incursión, resultó idóneo para la cría de los moluscos y otros organismos acuáticos, que evolucionaron en una fauna diversa y abundante en un tiempo sorprendentemente breve, quizá de unos miles de años. Este ambiente resultaba ideal también para los ostrácodos. Fernando Muñoz-Torres, de la compañía petrolera colombiana Ecopetrol, encontró que estos crustáceos pequeños (igual que los moluscos) experimentaron una especiación explosiva durante el mismo período. La escasa profundidad de lagos y canales, con el aislamiento parcial de algunas áreas, propició tan elevadas tasas de especiación.

Posteriormente, cuando el sistema de lagos interconectados dejó paso al río Amazonas ya desarrollado, se extinguió la mayoría de los moluscos y ostrácodos dulceacuícolas, necesitados de condiciones lacustres más tranquilas. Al propio tiempo, este paisaje cambiante favoreció la evolución de un conjunto más amplio de plantas y animales terrestres.

Uno de los descubrimientos más alentadores de los estudios geológicos recientes se refiere a la notable tenacidad (o "resiliencia") que muestran la flora y la fauna amazónicas. En el transcurso de los 23 millones de años de existencia de la pluviselva, ésta se ha mantenido, e incluso ha prosperado, a pesar de cambios tremendos en el paisaje: el levantamiento de las montañas orientales de los Andes, el nacimiento del río Amazonas y la inundación por agua de mar. ¿Nos atreveremos a confiar que tamaña persistencia ayude a la Amazonía a sobrevivir a los retos que los humanos le estamos planteando?

La autora

Carina Hoorn es geóloga y palinóloga adscrita al Instituto para la Biodiversidad y la Dinámica de los Ecosistemas de Amsterdam. Ha explorado ríos en la Amazonía, los Andes, el Himalaya y el Sultanato de Omán para identificar la influencia de estos ambientes sedimentarios en la vegetación local.

Bibliografía complementaria

ORIGIN AND EVOLUTION OF TROPICAL RAIN FORESTS. Robert J. Morley. John Wiley, 2000.

SEASONAL AMAZONIAN RAINFALL VARIATION IN THE MIOCENE CLIMATE OPTIMUM. Ron G. Kaandorp, Hubert B. Vonhof, Frank P. Wesselingh, Lidia Romero Pittman, Dick Kroon y Jan E. van Hinte en *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 221, n.os 1-2, págs. 1-6; 2005.

NEW CONTRIBUTIONS ON NEOGENE GEOGRAPHY AND DEPOSITIONAL ENVIRONMENTS IN AMAZONIA. Dirigido por C. Hoorn y H. B. Vonhof en *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 21, n.os 1-2; 2006.

La transferencia de electrones

en Geobacter sulfurreducens

No sólo los animales respiran. También algunas bacterias. El metabolismo de compuestos carbonados genera electrones que producen energía una vez transferidos a un aceptor final de electrones, como, por ejemplo, el oxígeno o un metal. Los procesos respiratorios que usan metales como aceptores finales de electrones han sido el objeto de intenso estudio; entre otras razones, porque podrían tratarse de una reminiscencia del metabolismo de las primeras formas de vida que habitaron una Tierra anóxica y rica en metales, en hierro (Fe) en particular.

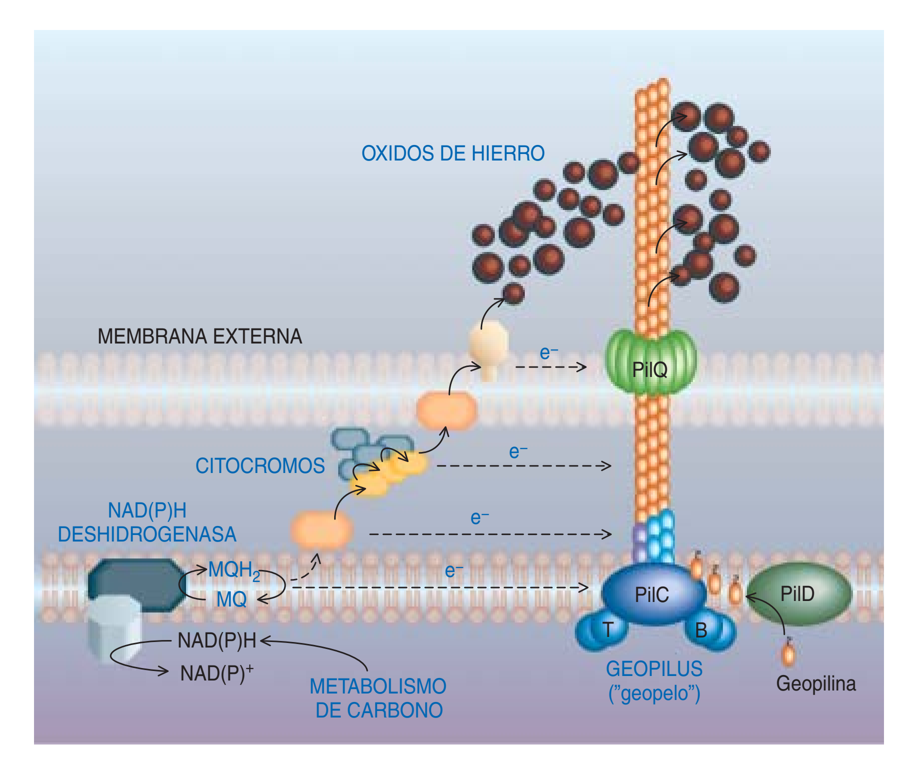
La capacidad de respirar el hierro de compuestos donde se encuentra triplemente oxidado —es decir, donde, tras el reparto de los electrones en la molécula, queda con una triple carga positiva (Fe[III])— se encuentra extendida por las diversas estirpes bacterianas. Pese a la amplia diversidad de éstas, la investigación de entornos ricos en este metal revela que las bacterias más abundantes y activas en la reducción del hierro —en añadirle electrones— pertenecen en su mayoría a la familia *Geobacteraceae*.

Las geobacteráceas reducen también otros metales, radiactivos algunos como el uranio. Pueden incluso transferir electrones a electrodos, con lo que generan electricidad. Abarca esta familia diversos géneros (*Geobacter*, *Pelobacter, Desulforomonas* y otros), que comparten la capacidad de respirar Fe(III). El proceso deben desarrollarlo en medios anóxicos, o con escasa presencia de oxígeno, pues les resulta tóxico.

Por su solubilidad, el oxígeno se difunde en el interior celular. El óxido de hierro, en cambio, es insoluble y no puede penetrar en la célula. Las geobacteráceas se ven así obligadas a transferir los electrones desde el interior de la célula hacia el medio externo, donde se encuentran las partículas insolubles de óxido de hierro. En su viaje, los electrones se encuentran con múltiples barreras. Tras generarse en el citoplasma, o medio acuoso interno de la célula, deben atravesar su membrana, el periplasmático y la membrana externa, desde donde se efectúa la transferencia a las partículas insolubles de óxido de hierro. Las geobacteráceas han de establecer contacto con los óxidos de hierro para poder reducirlos. Esta estrategia las distingue de otras bacterias reductoras de Fe(III), que secretan compuestos solubles para transportar los electrones a su destino final, los óxidos de hierro.

A lo largo de los últimos veinte años se ha venido aceptando que, en la transferencia de electrones, sólo intervenían los citocromos. En apoyo de esta teoría nos encontramos con que *Geobacter sulfurreducens* o *Geobacter metallireducens* poseen más de cien genes codificadores de esas proteínas. Al estar localizados en distintos estratos celulares, los citocromos crean una eficiente cadena de transporte de electrones desde el interior celular hasta los óxidos de hierro. Mas, a pesar del creciente número de trabajos dedicados a identificar y caracterizar los citocromos de la membrana externa celular que pudieran llevar a cabo el último paso de la transferencia de electrones a las partículas de óxido de hierro, ninguno de los citocromos estudiados parecía el último eslabón de la cadena.

Paradójicamente, la pista para identificar el misterioso componen-



Transferencia de electrones en *Geobacter sulfurreducens*. Los electrones generados en el metabolismo de los compuestos carbonados en forma de poder reductor se transfieren a una NAD(P)H deshidrogenasa y a la reserva de menaquinona (MQ) de la membrana citoplasmática. De ahí se transfieren a la cadena de citocromos para ser exportados a través del espacio periplasmático y la membrana externa. Los *geopili* constituyen el eslabón final de la cadena de transporte: transfieren los electrones directamente a las partículas de óxido de hierro.

te se encontraba en las bacterias del género *Pelobacter*, que carecen de citocromos. Ello no obsta para que reduzcan el Fe(III) con la misma eficiencia que las bacterias de los otros géneros de la familia de las geobacteráceas. La proximidad filogenética de *Pelobacter* a *Geobacter*, que sí posee un gran número de citocromos, avalaba la sospecha de un mismo proceso de transferencia de electrones.

Los últimos avances en secuenciación genómica permitieron identificar una proteína de la membrana externa celular presente tanto en las bacterias del *Pelobacter* como en los otros miembros de la familia. Esta proteína, denominada pilina (PilA), es homóloga a otras pilinas bacterianas. Las pilinas se polimerizan en la membrana externa y generan así largos y finos filamentos (*pili*), merced a los cuales pueden asirse las bacterias a una superficie. No sólo eso: con la extensión y retracción de esos pelos, las bacterias pueden avanzar por la superficie en cuestión.

La pilina de las bacterias de la familia *Geobacteraceae*, denominada geopilina, difería de otras pilinas bacterianas y formaba *pili* alojados sólo en uno de los lados de la célula. ¿Podría ser éste el misterioso último componente de la cadena de electrones? La respuesta es sí. Una mutación en el gen *pilA*, que codifica la geopilina de la bacteria *G. sulfurreducens*, produjo una cepa bacteriana capaz de unirse a los óxidos de hierro, pero incapaz de transferirles electrones. La introducción del gen de la cepa salvaje en ese mutante restauró la respiración de óxido de hierro.

Mediante el uso de un microscopio de fuerza atómica equipado con una sonda conductora, se demostró que, al contrario de los *pili* de otras bacterias, los *geopili* son buenos conductores de electrones. Estos resultados dan a entender que los *geopili* son los últimos componentes de la cadena de transporte de electrones a los óxidos de hierro, si bien se desconoce aún el mecanismo de conducción de electrones y sus posibles interacciones con los citocromos.

El descubrimiento de que los *geopili* funcionan como nanocables eléctricos abre nuevas puertas a su uso en el campo de la nanotecnia. Sirva este descubrimiento para demostrar una vez más que, a pesar de los muchos avances técnicos ideados por los seres humanos, las mejores lecciones nos las sigue dando siempre el mundo natural.

GEMMA REGUERA
Depto. de Microbiología,
Universidad de Massachusetts,
Amherst

Nuestro entorno estelar

El baile sutil de la Vía Láctea

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, se formó unos pocos miles de millones de años después de la gran explosión. Desde entonces han nacido en ella muchas generaciones de estrellas y ha absorbido varias galaxias satélite. Dado que nos encontramos en el interior de este sistema, es difícil estudiar su estructura y evolución, captar la forma en que las estrellas que la componen y se mueven en su seno permanecen juntas formando una estructura coherente, con sus elegantes brazos espirales.

Sabemos, no obstante, que el movimiento de las estrellas en nuestra galaxia es, en gran parte, muy ordenado: la mayoría de esos astros se mueven en órbitas casi circulares alrededor del centro galáctico. Sin embargo, una parte se mueve en direcciones peculiares.

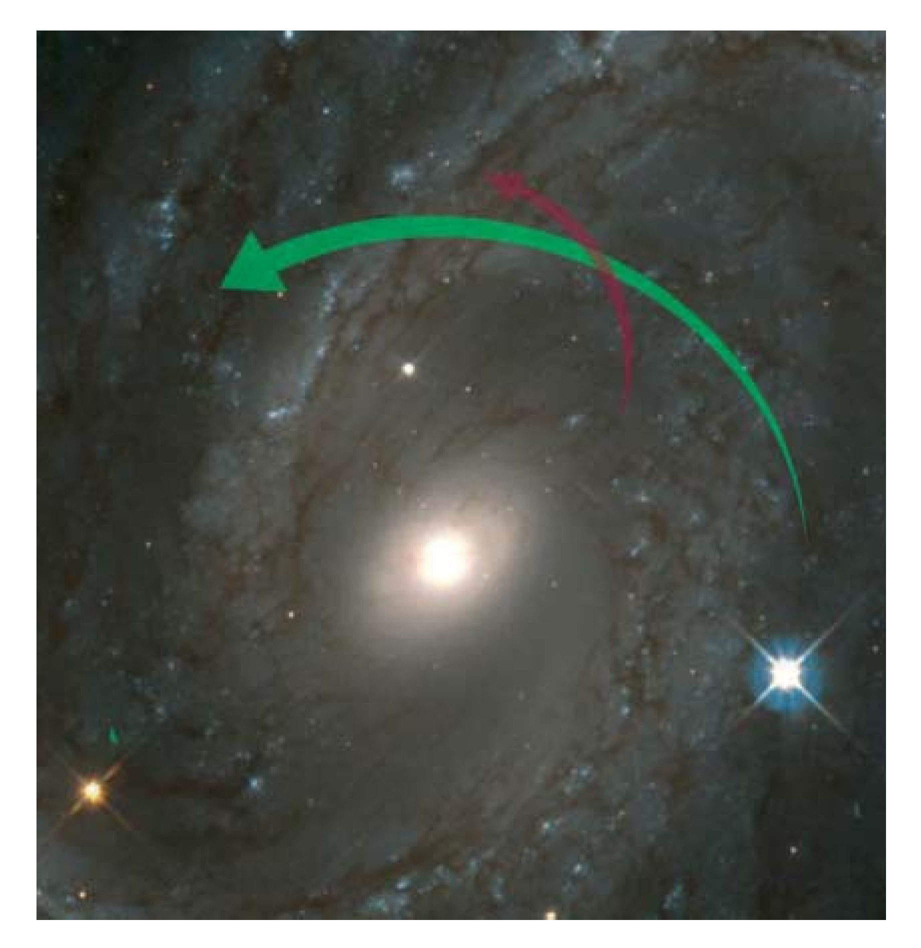
El satélite Hipparcos de la Agencia Europea del Espacio (ESA), lanzado en 1989, proporcionó las distancias y dos componentes de la velocidad (las proyectadas en la bóveda celeste) de más de cien mil estrellas, confinadas en una esfera de unos 1000 años-luz alrededor del Sol. Sin embargo, siguió sin conocerse la tercera componente de la velocidad de la mayoría de estos objetos: la velocidad radial. Ante ese reto, un consorcio de astrónomos suizos y franceses dedicó alrededor de 15 años a la medición de esta componente —se valieron del telescopio de un metro del Observatorio de la Alta Provenza— y poder contar así con las velocidades tridimensionales de 25.000 estrellas de Hipparcos.

A partir de estos datos, un equipo internacional de astrónomos de la Universidad de Barcelona y de la Universidad Libre de Bruselas ha realizado un detallado análisis del movimiento de unas 6000 estrellas gigantes. Son intrínsecamente muy brillantes, lo que las hace ideales para el estudio de la dinámica de nuestra galaxia. Por primera vez hemos podido analizar en detalle el movimiento en tres dimensiones de una muestra de estrellas estadísticamente significativa; con ello se han abierto grandes perspectivas para nuestra comprensión de la dinámica de las estrellas en la Vía Láctea.

Se sabe desde hace mucho que algunos grupos localizados de estrellas (cúmulos) se mueven de forma coherente en direcciones peculiares; se sabe también que frecuentemente están acompañados por estrellas de supercúmulo. Estos supercúmulos, aunque se hallan mucho más dispersos en el espacio que los cúmulos, se mueven en la misma dirección. Uno de los cúmulos más cercanos y famosos es el de las Híades, situado cerca de Aldebarán, estrella brillante de tonalidad anaranjada, de la constelación de Tauro. Este cúmulo, que se encuentra a unos 150 años-luz de la Tierra consta de unas cien estrellas. El supercúmulo que lo envuelve cubre una región mucho más extensa, que incluye al sistema solar.

Hasta ahora se atribuía la existencia del supercúmulo a un vestigio del cúmulo primordial, que se habría "evaporado" con el tiempo formando una especie de halo alrededor del núcleo. El movimiento del cúmulo y el supercúmulo en la misma dirección peculiar, proseguía la hipótesis, guardaría relación con el movimiento inicial del cúmulo primordial. No obstante, esto exigiría también que todas las estrellas del supercúmulo hubiesen nacido al mismo tiempo, en el cúmulo primordial, lo que entra en contradicción con el amplio abanico de edades que en realidad presentan.

De nuestro análisis se infiere una explicación más sencilla, que abarca el amplio rango de edades y el mo-



Mientras las estrellas normales siguen órbitas casi circulares en torno al centro galáctico (*verde*), las estrellas rebeldes "empujadas" por las ondas de densidad se mueven en direcciones peculiares (*rojo*).

vimiento peculiar del conjunto: estas "estrellas rebeldes" que se mueven en direcciones peculiares pueden haber sido "empujadas" en esa dirección por el paso de una onda de densidad espiral. Ondas de densidad de este tipo son la causa de los brazos espirales que observamos en otras galaxias externas y sabemos están presentes en la Vía Láctea. Se propagan por la galaxia independientemente del movimiento de las estrellas, como las olas del mar, que se propagan independientemente de las moléculas de agua.

Tales ondas de densidad pueden perturbar el movimiento de las estrellas y "empujarlas" en direcciones peculiares.

¿Cómo explicaríamos entonces que se observen cúmulos compuestos de estrellas jóvenes que se mueven conjuntamente con estrellas mucho más viejas? De una manera muy sencilla: unas y otras estrellas habrían sido empujadas en la misma dirección por la misma onda.

En nuestra hipótesis, ya no se considera al supercúmulo como un vestigio de un cúmulo primordial, sino que el movimiento de esas "estrellas rebeldes" estaría relacionado con la estructura espiral de la galaxia. El viejo concepto de supercúmulos debería reemplazarse por el de "corrientes dinámicas" de la galaxia. En nuestro análisis hemos hallado dos de estas corrientes, ligadas a los supercúmulos de las Híades y Sirio. Una tercera corriente, la de Hércules, parece guardar relación con la rotación de la barra central de la galaxia.

Nuestros resultados pueden también aportar datos sobre los exoplanetas, que son sistemas planetarios en torno a estrellas distintas del Sol. En efecto, el contenido en elementos pesados de nuestra galaxia disminuye desde el centro hacia el exterior. Las ondas espirales podrían ser las responsables de la presencia, en el entorno solar, de estrellas con una composición propia de regiones más internas de la galaxia. Se trata de una observación importante. Se ha comprobado, en efecto, que una composición rica en elementos pesados es un prerrequisito esencial para que una estrella pueda formar planetas a su alrededor, de modo que más de un sistema planetario de nuestro entorno podría haber emigrado de regiones más centrales de la galaxia, empujado hasta nosotros por una onda espiral.

Xavier Luri
Universidad de Barcelona

Benoit Famaey
y Alain Jorissen
Universidad Libre de Bruselas

La nuez de Brasil

Su importancia social, económica y ecológica

La nuez de Brasil (*Bertholletia excelsa*), ahora llamada nuez amazónica, es una especie que, pese a hallarse en casi todo el oriente de Sudamérica, sólo se explota comercialmente en Brasil, Bolivia y Perú. El mayor porcentaje de áreas con densidades altas de este recurso natural se encuentra en bosques naturales muy poco perturbados por el ser humano. Cubren unas 20 millones de hectáreas, muchas de ellas aprovechadas primero por el caucho o jebe, antes y durante la segunda guerra mundial. Tras la caída del precio del caucho, la nuez amazónica se convirtió en el principal recurso de esas regiones, y sigue siéndolo. Desgraciadamente, con el avance de las ciudades y las carreteras desaparecen grandes extensiones de estos bosques, muchas convertidas en chacras o potreros.

La extracción de la nuez amazónica varía muy poco entre los tres países; es más intensiva en bosques cercanos a poblados o dentro de los mayores sistemas viales, es decir, cerca de ríos o carreteras importantes. Su aprovechamiento varía

también de acuerdo con las diferentes normas legales de los tres países, bajo las modalidades de concesiones, plantaciones privadas o estatales, bosques comunitarios o regionales, etc. En Brasil y Bolivia, por ejemplo, es muy común la formación de cooperativas.

La zafra, como se llama a la época de la cosecha de la nuez amazónica, comienza cada año cuando se inicia la época de lluvias. Es impresionante el caso de Bolivia; entre los meses de octubre a diciembre miles de personas de las partes altas marchan a las zonas productoras, tanto de ese país como en las zonas fronterizas de Brasil, para trabajar en ellas los 4 a 6 meses que dura la campaña.

En Perú las concesiones que otorga el Estado exclusivamente para el aprovechamiento de la nuez amazónica abarcan unas 1000 hectáreas, trabajadas sobre todo por unidades familiares sin mucho poder económico. En el departamento de Madre de Dios, en el sureste de Perú, existen más de 1500 concesiones legalmente establecidas, es decir, 1500 familias que tienen acceso al aprovechamiento directo de la nuez.

Cada titular de la concesión inicia los preparativos para la campaña a inicios de enero. Consisten principalmente en conseguir algún crédito o préstamo para financiar la permanencia en el campo. Se necesitan víveres para 1 o 2 meses y combustible. Por desgracia, no existen entidades estatales o privadas que den créditos a familias sin recursos. El titular se endeuda con prestamistas que ponen como condición la compra del producto en cáscara.

Los frutos maduros de la nuez amazónica pueden pesar hasta un kilogramo. Empiezan a caer a fines de noviembre. Por seguridad, se entra en las concesiones a mediados de enero, cuando la mayor parte de los frutos han caído ya.

Ingresa en el terreno un grupo de 7 a 10 personas, dependiendo del tamaño y de la producción de la concesión. La actividad coincide con las vacaciones escolares, lo que permite que los niños vayan junto a sus padres. Un equipo de extracción consta de 4 o 5 personas que reúne y abre los frutos y transporta los sacos a los campamentos, una



1. Fruto y semillas de la nuez amazónica. Obsérvese el tamaño del fruto.



2. Mujeres contratadas para la extracción de la nuez amazónica en una planta procesadora en las cercanías de Puerto Maldonado, en Perú.

cocinera, un ayudante y los niños. La reunión de los miles de miles de frutos es manual y la extracción de las semillas se realiza abriendo cada fruto con machete. En esta fase la participación de los niños es importante. En la mayoría de los casos, el transporte de las semillas en sacos de 70 a 80 kilogramos de peso (108 litros) se realiza en la espalda del trabajador, muchas veces recorriendo distancias de 2 a 4 kilómetros hasta los campamentos. Las semillas pueden secarse y pelarse en el campo o, una vez devuelto el préstamo, pueden transportarse, en cáscara, por río o carretera, a la ciudad, ya sea a las casas o a las plantas procesadoras. En el transporte del producto participan motoristas, camioneros y estibadores. Para el proceso de pelado, selección y embalaje se contratan mujeres; manipulan millones de semillas y nueces una a una.

Mas del 80 % de la producción de primera calidad de la nuez amazónica va dirigida a los mercados europeos y norteamericanos. Los tres países ingresan así de 60 a 80 millones de dólares por año. En el caso de Perú, se calcula que alrededor del 38 % de la población de Madre de Dios depende directa o indirectamente de esa actividad.

Ecológicamente, la nuez amazónica tiene una gran importancia, pues la mayor parte de su producción viene de bosques naturales hasta ahora bien conservados; tiene, además, interacciones muy específicas con sus agentes polinizadores y dispersores. Aunque por ahora la especie no ha perdido su sostenibilidad ecológica, la investigación ha demostrado que la extracción intensiva de la semilla durante muchas décadas puede generar un envejecimiento de sus rodales originarios, al no haber regeneración natural que reemplace los árboles maduros.

¿Qué futuro le espera a la nuez amazónica? Podemos ser optimistas y decir que es halagüeño. Nuevas leyes la protegen; su certificación orgánica (que garantiza que la producción se atiene a las normas de la agricultura biológica) es una realidad y parece mejorar la respuesta de los llamados “mercados verdes y solidarios” hacia este producto totalmente natural, ecológico y de enorme importancia social. Sigue siendo necesario que se fortalezcan las asociaciones, cooperativas y federaciones que agrupan a los extractores, y quizá deba haber una relación más directa entre éstos y los grandes mercados internacionales.

FERNANDO CORNEJO VALVERDE
Botanical Research Institute of Texas,
Puerto Maldonado, Madre de Dios
Perú

La proteína PLZF

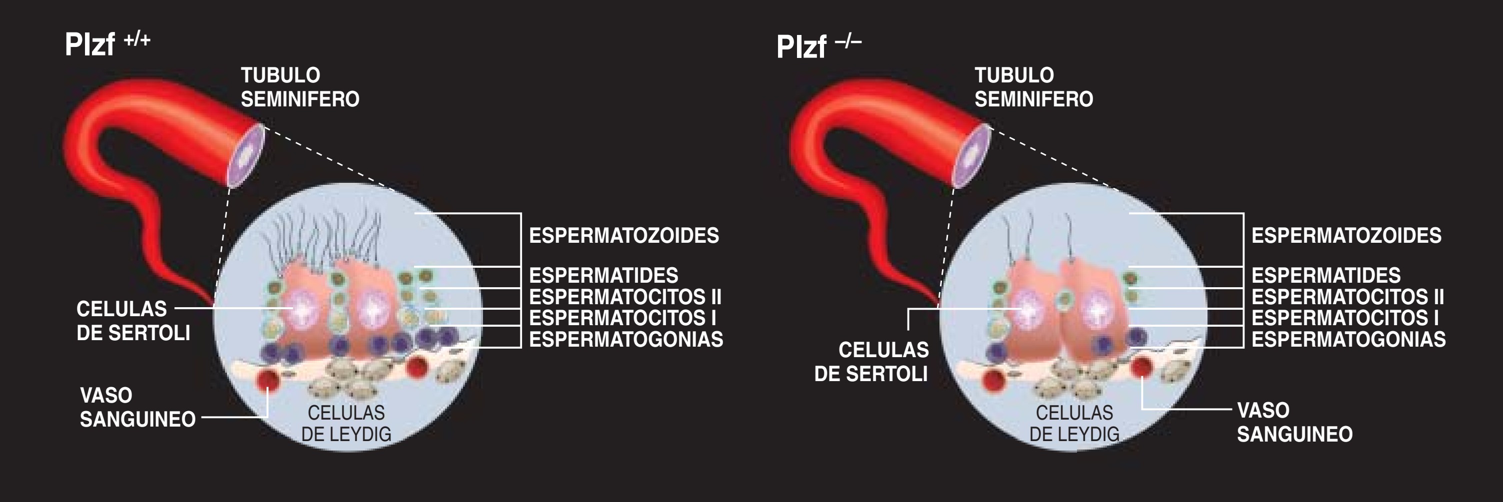
Desarrollo, cáncer y células madre

En su renovación incesante, las células madre se perpetúan, y a través de su diferenciación generan las células especializadas de cada tejido. Abundan las pruebas que sugieren la existencia de una relación entre los programas moleculares que regulan la biología de las células madre y la de las células tumorales. Unas y otras no sólo comparten la capacidad de perpetuarse, sino que muchas de las vías vinculadas al proceso de oncogénesis se hallan, a su vez, implicadas en el mantenimiento de las células madre.

Una de estas vías es la que depende de la proteína PLZF (de “Promyelocytic Leukemia Zinc Finger”), descubierta a mediados de los años ochenta a raíz de la caracterización de la translocación entre el cromosoma 11 y 17 t(11;17)(q23;q21). La alteración génica va asociada a la leucemia promielocítica aguda (APL).

En virtud de la translocación mencionada, dos genes, el que codifica a PLZF y al receptor de ácido retinoico α (RARα), se fusionan para dar lugar a la síntesis de dos proteínas oncogénicas.

La proteína PLZF, represora del proceso de transcripción, pertenece a una familia de proteínas que se caracterizan por poseer un dominio muy conservado en su extremo amino-terminal y una serie de dedos de zinc de tipo Krüppel en su extremo carboxi-terminal. El dominio amino-



La proteína PLZF desempeña una función esencial en el mantenimiento de la población de células madre germinales. La inactivación del gen *Plzf* produce la paulatina desaparición de tales células y, por tanto, la progresiva degeneración del testículo.

terminal le permite homodimerizar y heterodimerizar con otras proteínas; los dedos de zinc le confieren la especificidad de su actividad represora transcripcional sobre determinados promotores.

En el transcurso del proceso leucémico asociado a este tipo de translocación, las funciones fisiológicas que PLZF desempeña se encuentran alteradas, debido sobre todo a la acción de las proteínas de fusión.

La obtención, mediante ingeniería genética, de un ratón con el gen *Plzf* inactivado nos ha permitido ahondar en la fisiología de la proteína PLZF. Si bien no ha terminado todavía la caracterización de su fenotipo, conocemos ya algunas funciones que PLZF ejerce, entre ellas la regulación transcripcional de la familia de genes *Hox*, que operan como interruptores en el control del diseño corporal. PLZF participa en la regulación del patrón de formación de los miembros así como del esqueleto axial.

En fecha reciente se ha descubierto una nueva función de la proteína PLZF, que guarda relación con la biología de las células madre. El polipéptido desempeña un papel esencial en el mantenimiento de estas células multipotenciales: controla el proceso de toma de decisión por parte de las mismas sobre si proliferar o diferenciarse. En concreto, ello se ha demostrado en las células madre germinales del testículo, las espermatogonias.

La espermatogénesis constituye un modelo paradigmático en el estudio y caracterización de las células madre. El ciclo de la célula madre germinal en el adulto se encuentra en estado quiescente; el entorno celular regula la capacidad de la célula troncal para generar los distintos tipos celulares.

En los ratones, la espermatogonia se origina a partir de la célula germinal primordial, que, a su vez, surge del mesodermo extraembrionario a partir del séptimo día del desarrollo embrionario (E7). Estas células, una vez emigran desde la alantoides hasta la cresta genital, lo que ocurre alrededor del día E11.5, proliferan sin cesar hasta el día E16.5, momento en que su ciclo celular se detiene entre la fase de quiescencia (G0) y la de inicio del ciclo (G1).

Mientras estas células proliferan, son rodeadas por las células de Sertoli. Así empieza a definirse la estructura básica de lo que será el túbulo seminífero. Tales células germinales mitóticamente quiescentes, o gonocitos, entran de nuevo en el ciclo celular transcurrido medio día después del nacimiento (día P0.5 del período postnatal), migrando desde su posición inicialmente central en el túbulo seminífero hasta la membrana basal. Cuando comienza el período prepuberal, las espermatogonias adquieren las características propias de las células madre, una vez éstas han alcanzado la membrana basal. Desde ese mismo instante, estas células procederán como las células madre de cualquier compartimiento celular.

Aunque se sabe muy poco acerca del proceso molecular que subyace bajo la renovación y diferenciación de este tipo de células madre, sí parece manifiesto que PLZF desempeña una función esencial en el mantenimiento de esta población celular, ya que la ausencia del gen provoca la pérdida progresiva de las células madre a lo largo de la vida. Así ha quedado demostrado tras el estudio de dos modelos animales: uno en el que se ha producido la pérdida del gen tras la aparición de una mutación espontánea (luxoid) y otro en el que se ha eliminado el gen mediante manipulación genética.

En resumen, la proteína PLZF ofrece un interesante vínculo de unión entre el desarrollo, la biología del cáncer y el mantenimiento de las células madre. Un conocimiento más profundo de los mecanismos moleculares que controlan la autorrenovación de las células madre podría tener un gran impacto en el desarrollo de nuevas terapias contra el grupo de enfermedades que se cobijan bajo la denominación común de cáncer.

JOSÉ ANTONIO COSTOYA PUENTE
Dpto. Fisiología,
Facultad de Medicina,
Universidad de Santiago
de Compostela

De cerca

Wolf Isbert, Covadonga Orejas y Jorge Bartolomé

El sexto sentido

1. Arrecifes de coral en el océano Indico. Las zonas de arrecife constituyen uno de los hábitats habituales de numerosas especies de tiburones.

Los peces cartilaginosos (condrictios) habitan en todos los mares y algunos ríos desde hace más de 350 millones de años. A este grupo pertenecen tiburones, rayas y quimeras. Se conocen más de 900 especies. A lo largo de su evolución, han desarrollado un sexto sentido: la sensibilidad a la electricidad, que se ejerce a través de las "ampollas de Lorenzini". Mediante sensores de alta precisión, este órgano electrorreceptor capta y procesa las señales eléctricas que emiten otros organismos.

Los delfines y los murciélagos emiten señales acústicas que, tras reflejarse en otros organismos y objetos, las reciben de nuevo para registrar y procesar información sobre el medio. En los tiburones, en cambio, la percepción electromagnética constituye un proceso pasivo. Esta capacidad de recibir de forma pasiva estímulos electromagnéticos se conoce también en los celacantos, en algunos silúridos y anfibios, y en los ornitorrincos. Según investigaciones recientes, los primeros vertebrados habrían adquirido ese "sexto sentido", que habrían perdido al pasar del medio acuático al terrestre. Ese peculiar órgano sensorial resulta inútil en el medio aéreo, porque la conducción eléctrica es baja.

En los tiburones, las ampollas de Lorenzini se encuentran repartidas por toda la cabeza y principalmente en la zona cercana a las fauces. Constan de un canal, relleno de una sustancia gelatinosa, que comunica las células sensitivas de la piel con el medio externo. Dado que la resistencia eléctrica del canal es menor que la de la piel circundante, las señales eléctricas penetran y avanzan hacia las células electrorreceptoras, que transportan la información hasta el cerebro, a través de fibras nerviosas. Este sistema de alta precisión capta señales eléctricas muy débiles: por ejemplo, las que produce el campo eléctrico de una jaula metálica o una pila vacía.

Las ampollas de Lorenzini desarrollan en los peces cartilaginosos una función principal: la detección de presas. Todos los seres vivos generan campos eléctricos cuando contraen sus músculos; el propio latido cardiaco crea un campo de este tipo. De ahí que los peces cartilaginosos detecten cualquier organismo, incluso los que permanecen enterrados en la arena. Se piensa que este órgano podría tener también una función de orientación en los viajes migratorios de especies como los tiburones ballena o martillo, que se guiarían por las señales del campo magnético terrestre.



2. La mayoría de los peces cartilaginosos (tiburones, rayas y quimeras) son grandes depredadores. Necesitan sistemas de detección de presas especializados. Muchos depredadores terrestres utilizan el olfato para detectar presas a varios kilómetros de distancia. Los tiburones, además, se sirven de las ampollas de Lorenzini para captar los campos electromagnéticos débiles que se generan en las contracciones musculares de sus presas.



3. Las ampollas de Lorenzini se hallan en la zona lateral de la cabeza, cerca de las fauces.

JOSEP MARIA GILI (*arriba*)

4. Detalle de la parte inferior de la cabeza de una raya en la que se aprecian las entradas de las ampollas de Lorenzini.



El origen de las fulguraciones solares

La astronomía de observación comienza a desentrañar los mecanismos que causan estas inmensas erupciones de la atmósfera del Sol



A finales de octubre y primeros de noviembre de 2003 se observaron algunas de las fulguraciones solares más intensas jamás registradas. Esas emanaciones masivas de partículas cargadas llegaron con toda claridad a la Tierra y a sus cercanías, a 150 millones de kilómetros de distancia de su fuente solar. La lluvia de partículas que alcanzó nuestros aledaños espaciales fue tan intensa en algunos momentos, que hubo que desactivar temporalmente muchos satélites científicos y de comunicaciones. Algunos sufrieron incluso daños irreversibles. Los astronautas de la Estación Espacial Internacional corrieron peligro también; se refugiaron en su módulo de servicio, hasta cierto punto bien blindado. Más cerca de casa, las rutas de las líneas aéreas fueron desviadas de las latitudes altas, donde a los pilotos les habría sido difícil comunicarse por radio y donde los pasajeros y la tripulación habrían recibido niveles de radiación preocupantes. Se vigilaron con especial atención las redes eléctricas para evitar excesos de tensión. A pesar de todos los esfuerzos, unos 50.000 residentes del sur de Suecia sufrieron un breve apagón.

DON DIXON

1. LAS EXPLOSIONES REPENTINAS de la atmósfera solar liberan una energía equivalente a miles de millones de bombas atómicas en apenas unos minutos. Se originan por una abrupta reordenación de los campos magnéticos solares, que describen sobre la superficie del Sol arcos redibujados por el gas encendido que arrastran.

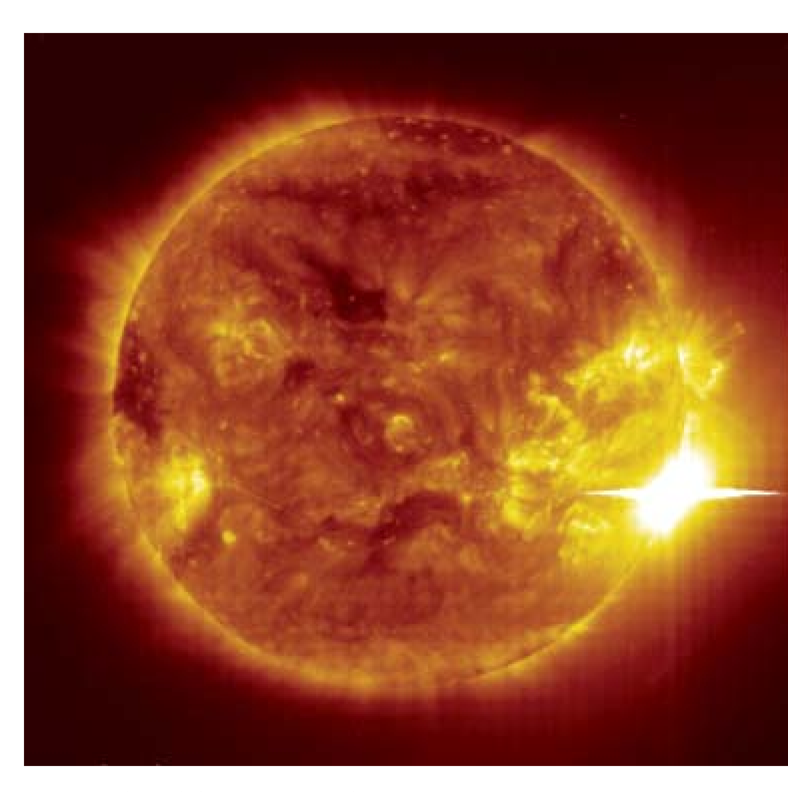
Gordon D. Holman

Por fortuna, el campo magnético y la atmósfera de la Tierra nos protegen de los estragos de las tormentas solares, incluso de las peores. Sin embargo, la creciente dependencia social de las nuevas técnicas nos vuelve en cierta medida vulnerables [*véase* "Tormentas espaciales", por James L. Burch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio 2001]. El mayor peligro potencial de una fulguración vigorosa reside en la materia arrojada a alta velocidad desde la atmósfera del Sol, las eyecciones de masa coronal, en el argot científico. Algunos de estos sucesos proyectan cantidades gigantescas de gas ionizado por trayectorias de colisión con la Tierra. Así ocurrió en varias de las intensas fulguraciones de 2003.

Aunque se lleva mucho tiempo intentando elucidar los mecanismos que producen tanto las fulguraciones como las eyecciones de masa coronal asociadas, sólo a lo largo de los últimos años han tenido las observaciones calidad suficiente para revelar los detalles y esclarecer la física que explica dichos fenómenos, avance que se debió en buena medida a las técnicas nuevas de los años noventa. El secreto de las fulguraciones reside en una reordenación repentina, o "reconexión", de las líneas del campo magnético.

Arcos apuntados

El clima en la Tierra, aunque muy complejo, deriva de procesos que nos son familiares: el calentamiento solar, las diferencias de presión en el aire y los cambiantes patrones de los vientos. De ahí que tengamos un conocimiento intuitivo de por qué el cielo aparece despejado un día y cubierto al siguiente. Por el contrario, las fulguraciones solares y otros aspectos del "clima espacial" se deben a la interacción entre los campos magnéticos y un gas caliente, ionizado (es decir, cuyos átomos han perdido sus electrones). Las interacciones no se observan directamente y su visualización resulta compleja, incluso para los especialistas. Que la reconexión magnética origina las fulguraciones solares es una idea que se remonta a los años cincuenta y sesenta del pasado siglo. No obstante, la prueba observacional se ha hecho esperar tanto, que algunos llegaron a dudar de la teoría.



2. LA FULGURACION DEL 4 DE NOVIEMBRE DE 2003 superó a cualquiera que se haya registrado. Su brillo saturó el detector del telescopio que capta la radiación del ultravioleta extremo en el Observatorio Heliosférico y Solar; de ahí la línea horizontal espuria que se ve en esta imagen (*izquierda*). Al igual que en casos anteriores, había muy cerca una mancha solar, una región de campos magnéticos particularmente intensos, (*derecha*).

SOHO/EIT (ESA Y NASA) (*fulguraciones y mancha solar*)

Suele darse por sentado que la energía liberada en una fulguración ha de estar almacenada primero en el campo magnético solar. Tal premisa se basa en que las fulguraciones surgen en las regiones activas del Sol, donde el campo magnético es bastante más intenso que la media. Estas regiones se identifican por la presencia de las manchas solares, áreas de apariencia oscura que albergan los campos magnéticos más intensos del Sol. En dichas regiones, las líneas del campo magnético se extienden desde la superficie hasta la corona, la capa más externa de la atmósfera solar, formando enormes arcos que atrapan gas muy caliente: a varios millones de kelvin. Estas temperaturas son tan altas, que el gas retenido emite sobre todo radiación ultravioleta extrema y rayos X [*véase* "La paradoja de la corona solar", por Bhola N. Dwivedi y Kenneth J. H. Phillips; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2001]. Las fulguraciones que en ocasiones brotan de las regiones activas emanan de esas estructuras magnéticas y hacen que el gas de los arcos se caliente más de lo habitual, hasta darle una temperatura entre los 10 y 40 millones de kelvin.

Aparte de la asociación entre fulguraciones y campos magnéticos intensos, durante mucho tiempo sólo se han tenido ideas muy vagas sobre los diversos procesos

Resumen/La física de las fulguraciones

- Las fulguraciones solares liberan en unos minutos una energía equivalente a miles de millones de bombas atómicas. Estas explosiones dan lugar a erupciones de rayos X y de partículas cargadas, algunas de las cuales pueden chocar contra la Tierra, poner en peligro los satélites artificiales y provocar cortes de corriente.
- Los tumultuosos campos magnéticos del Sol proporcionan el combustible necesario para las fulguraciones. La liberación repentina de energía de una fulguración proviene de un proceso de reconexión, en virtud del cual las líneas de dos campos magnéticos con sentidos opuestos se recombinan y aniquilan parcialmente entre sí.
- Aunque hace muchos años que se estudia la teoría de la reconexión magnética en el Sol, hubo que esperar a que las sondas espaciales suministraran pruebas observacionales del fenómeno. Entre los claros indicios figuran los arcos magnéticos apuntados que se han fotografiado debajo del lugar de la reconexión magnética.



que intervienen. Poco a poco se ha ido vislumbrando que los arcos de campo y el gas caliente relacionados con las fulguraciones han de diferir bastante de otras estructuras de aspecto muy similar que se ven también en las regiones activas. Los primeros indicios de una tal diferencia se encontraron hace unos 14 años, gracias a las mediciones del satélite japonés Yohkoh, la primera sonda en obtener imágenes de las fulguraciones solares en longitudes de onda que llegaban hasta los rayos X de energía moderada (útiles para rastrear el gas muy caliente). En algunas fulguraciones, los arcos magnéticos mostraban un curioso aspecto puntiagudo, al estilo de los arcos góticos, cuando lo habitual es que sean redondeados.

Al examinar los datos del Yohkoh, Satoshi Masuda descubrió que la punta de una de las fulguraciones ojivales de 1992 emitió una cantidad enorme e insólita de rayos X de alta energía (longitudes de onda muy cortas). Dedujo que la fuente de tal radiación era un paquete de gas excepcionalmente caliente (a unos 100 millones de kelvin), que brillaba con intensidad en las longitudes de onda cortas de los rayos X. Cabía una explicación alternativa: algo podría haber acelerado los electrones de esa zona hasta velocidades altísimas, produciéndose la emisión en rayos X al frenarlos de manera repentina los iones del gas circundante.

Ninguna de las dos posibilidades dejaba de ser misteriosa. Si el gas estaba tan caliente, ¿cómo podía permanecer confinado en una zona restringida? Y si los rayos X procedían de los choques entre electrones acelerados e iones, ¿por qué la radiación nace de una fuente tan compacta cerca de la punta del arco y no de los pies, donde la densidad del gas es mayor?

Para responder a tales preguntas se necesitaban mediciones que distinguieran los efectos del gas caliente de los efectos de los electrones acelerados. Y para comprender dónde y cuándo sucedía la actividad relevante, se precisaban también imágenes frecuentes de la radiación solar en todo el rango de energías entre los rayos X y los rayos gamma. La falta de estos datos supuso una barrera en el avance de los investigadores durante diez años, pero en el año 2002 la NASA lanzó el Cartógrafo Espectroscópico Solar de Alta Energía Ramaty (RHESSI son las siglas en inglés), que puede captar imágenes detalladas de la cúspide de ciertas fulguraciones solares. RHESSI ha proporcionado la prueba definitiva que confirma que la reconexión magnética engendra las fulguraciones y las eyecciones de masa coronal.

Juegos de líneas

Para entender el proceso de la reconexión primero hay que saber de qué modo los invisibles lazos magnéticos atrapan gas caliente en la atmósfera del Sol. Es mejor llamar plasma a este gas porque se compone, sobre todo, de electrones y protones separados entre sí; conduce, pues, la electricidad. Un campo eléctrico empuja a lo largo de sus líneas de campo las partículas que transportan la carga, con lo que se generan corrientes eléctricas. El campo magnético ejerce también una fuerza sobre las partículas cargadas y las hace girar alrededor de las líneas del campo magnético.

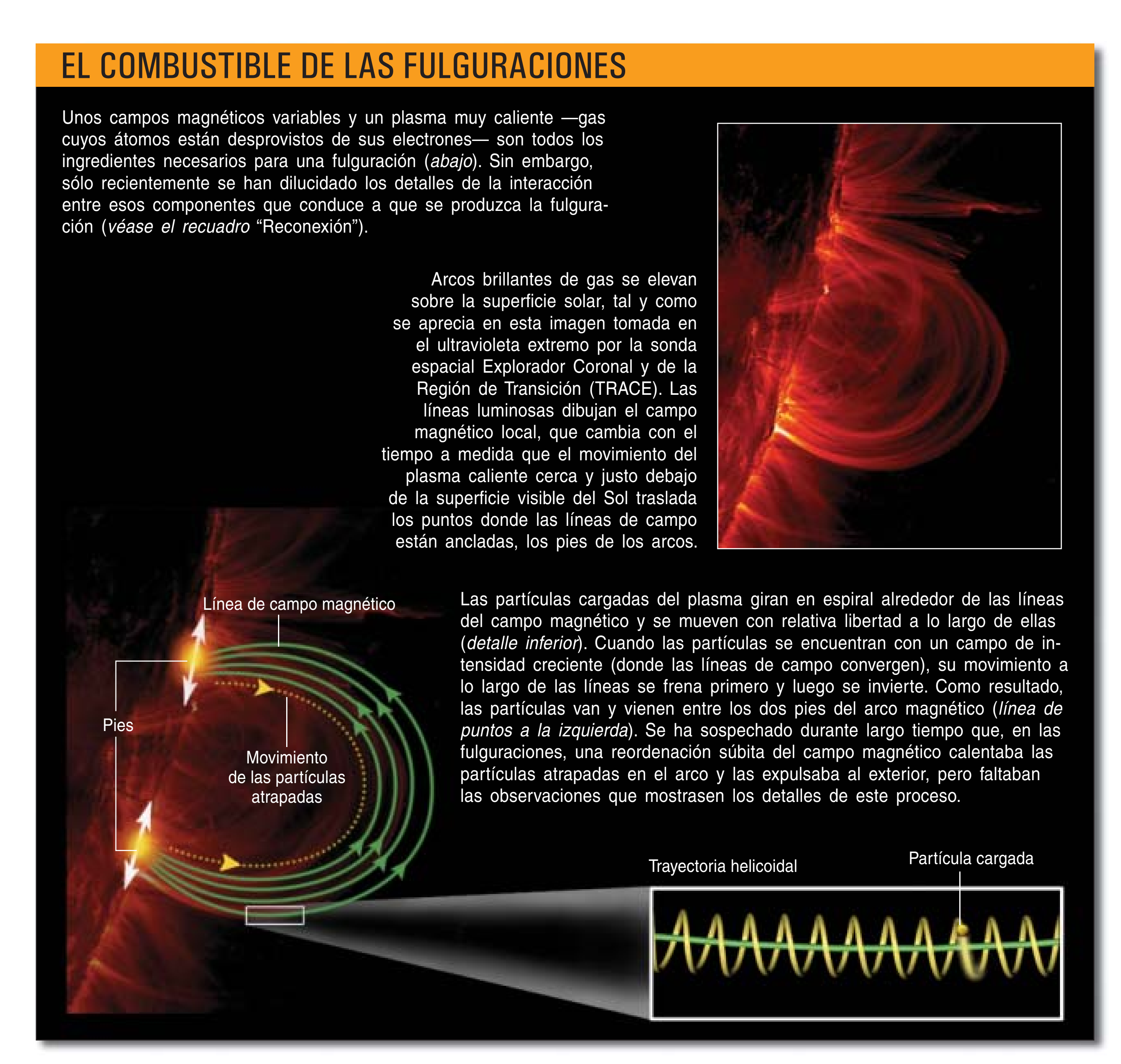
Aunque los electrones y protones quedan por ello obligados a girar alrededor de las líneas magnéticas, se pueden mover con relativa libertad a lo largo de dichas líneas. Y digo "relativa libertad" porque las partículas cargadas experimentan una fuerza de retardo cuando viajan a lo largo de líneas convergentes. Así, por ejemplo, durante el descenso desde lo alto de un arco magnético hacia su base, una partícula se verá frenada a medida que se acerque a uno de los pies del arco, donde las líneas de campo convergen y la intensidad magnética es mayor. Finalmente, ese campo cada vez más intenso frena del todo al electrón o al protón y lo empuja de nuevo hacia arriba. Viene a ser como arrojar una bola contra un colchón. Pero al contrario que la bola, que cede su energía de movimiento para comprimir los muelles del colchón, las partículas cargadas del Sol no transfieren energía al campo magnético. La energía de su movimiento se invierte en aumentar la frecuencia del movimiento giratorio alrededor de las líneas del campo magnético. Así, los dos pies del arco magnético actúan como espejos, reflejando los protones y los electrones de un lado al otro: constituye una trampa genuina de partículas cargadas.

Aunque sorprenda, el plasma puede alterar las líneas de campo que lo mantienen confinado. Y puede hacerlo porque, al tratarse de un mar de partículas cargadas, habrá corrientes eléctricas siempre que haya una diferencia de potencial. En los circuitos eléctricos que nos son familiares —por ejemplo, el de una linterna—, la pila proporciona la diferencia de potencial. En el Sol no existe nada parecido a una pila, pero los cambios en los campos magnéticos inducen diferencias de potencial (de acuerdo con los mismos principios físicos que operan en un generador eléctrico) y por tanto generan corrientes eléctricas. Para complicar aún más las cosas, las corrientes eléctricas producen a su vez nuevos campos magnéti-



3. UNA INTENSA AURORA BOREAL iluminó el cielo nocturno de Alaska en octubre de 2003; la generó una fuerte actividad solar. Los flujos de partículas cargadas procedentes del Sol encienden auroras boreales cuando alcanzan la Tierra y entran en contacto con las capas altas de la atmósfera. Estas y otras partículas energéticas viajan a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre.

KEVINSCHAFER.COM



EL COMBUSTIBLE DE LAS FULGURACIONES

Unos campos magnéticos variables y un plasma muy caliente —gas cuyos átomos están desprovistos de sus electrones— son todos los ingredientes necesarios para una fulguración (*abajo*). Sin embargo, sólo recientemente se han dilucidado los detalles de la interacción entre esos componentes que conduce a que se produzca la fulguración (*véase el recuadro* “Reconexión”).

Arcos brillantes de gas se elevan sobre la superficie solar, tal y como se aprecia en esta imagen tomada en el ultravioleta extremo por la sonda espacial Explorador Coronal y de la Región de Transición (TRACE). Las líneas luminosas dibujan el campo magnético local, que cambia con el tiempo a medida que el movimiento del plasma caliente cerca y justo debajo de la superficie visible del Sol traslada los puntos donde las líneas de campo están ancladas, los pies de los arcos.

Las partículas cargadas del plasma giran en espiral alrededor de las líneas del campo magnético y se mueven con relativa libertad a lo largo de ellas (*detalle inferior*). Cuando las partículas se encuentran con un campo de intensidad creciente (donde las líneas de campo convergen), su movimiento a lo largo de las líneas se frena primero y luego se invierte. Como resultado, las partículas van y vienen entre los dos pies del arco magnético (*línea de puntos a la izquierda*). Se ha sospechado durante largo tiempo que, en las fulguraciones, una reordenación súbita del campo magnético calentaba las partículas atrapadas en el arco y las expulsaba al exterior, pero faltaban las observaciones que mostrasen los detalles de este proceso.

TRACE (INSTITUTO STANFORD-LOCKHEED PARA LA INVESTIGACION ESPACIAL/PROGRAMA DE LA NASA DE PEQUEÑOS EXPLORADORES) (*imagen*); DON DIXON (*ilustración*)

cos. Este efecto, unido al desplazamiento errático de los pies de un arco magnético, genera en la atmósfera solar un surtido siempre cambiante de campos magnéticos muy distorsionados, con abundante energía de campo magnético, el combustible de las fulguraciones solares.

Los párrafos anteriores describen sólo parte de los fundamentos físicos de lo que sucede, bien conocidos desde hace muchos años. El problema aparece cuando se intenta explicar con exactitud la conversión de esa energía del campo magnético en calor, partículas aceleradas y material expulsado. Basta con pensar en un circuito eléctrico cualquiera para intuir una posible explicación. No sólo se caracterizará por la corriente que transporta y el voltaje que la produce, sino también por la resistencia eléctrica presente. El filamento de una bombilla opone resistencia a la corriente eléctrica que fluye por él; por eso disipa energía en forma de luz y calor. La atmósfera solar exhibe también resistencia eléctrica, puesto que las partículas que conforman las corrientes eléctricas chocan en ocasiones unas con otras; se obstaculiza su movimiento y la zona se calienta. Además, el voltaje causante de la corriente lleva un campo eléctrico propio: si es lo bastante intenso, los electrones y los iones se acelerarán y acabarán saliendo del plasma caliente. Y con esto tenemos ya los componentes de una fulguración: el calor y las partículas de alta energía.

Este razonamiento tan nítido, sin embargo, no se sostiene. Una de las razones estriba en la parquedad de la resistencia eléctrica en la corona; no permite explicar el ritmo explosivo con el que se encienden las fulguraciones solares. Y aunque la resistencia fuera mayor, todavía resultaría difícil explicar la concentración de gran cantidad de energía magnética en un lugar acotado y su posterior liberación en una erupción repentina. Se sabe desde hace mucho que la generación de un voltaje capaz de crear una corriente simple no podría calentar la atmósfera solar con suficiente rapidez; tampoco produciría un flujo de partículas aceleradas que bastase para generar una fulguración.

Con el tiempo, se fueron proponiendo ideas de mayor complejidad: quizá las fulguraciones tengan su origen, se decía, en muchas corrientes distintas que se juntan o en un volumen de ondas de plasma turbulentas, con los campos eléctricos asociados. Es posible que coincidencias como ésas desencadenen una fulguración, pero así no se explican todas las observaciones, en concreto las eyecciones de materia coronal que acompañan a las fulguraciones más intensas. Una teoría más prometedora es la que abarca la dinámica del campo eléctrico y la del campo magnético. Veamos primero la física de estos campos con mayor detalle.

Los campos magnéticos tienen una dirección asociada. Alrededor de una barra magnética las líneas de fuerza apuntan desde el polo norte hacia el sur. Si en un plasma se juntan dos campos magnéticos paralelos y sentidos opuestos, se creará entre ellos una corriente eléctrica con forma de lámina plana. (Suele pensarse que una corriente eléctrica ha de fluir en una dimensión, como por un cable, pero en el Sol, donde toda la atmósfera es conductiva, no hay nada que impida que la corriente fluya en planos bidimensionales.) La energía contenida en los dos campos magnéticos decae con el tiempo, a medida que la resistencia disipa la corriente eléctrica de la lámina.

En 1956, Peter Alan Sweet, entonces en el Observatorio de la Universidad de Londres, se percató de que la energía del campo magnético decaería mucho más deprisa si las líneas opuestas de los campos se rompiesen y se volvieran a juntar, se "reconectaran", en la lámina de la corriente que forman entre ellas. Los dos campos opuestos se anularían mutuamente en una explosión de energía, de una forma similar a lo que sucede en la aniquilación de la materia y la antimateria. Los campos magnéticos cercanos y el plasma donde estuviesen sumergidos fluirían por ambos lados de la lámina. Todo esto ocurriría de forma tal, que los nuevos campos magnéticos —los que conectan las líneas rotas de los campos anteriores— y el plasma saldrían expelidos más allá de los bordes de la lámina. A finales de los años cincuenta y principios de los sesenta Eugene N. Parker, de la Universidad de Chicago, elaboró los cálculos que describen este proceso, ahora llamado de reconexión magnética de Sweet-Parker.

Pero tal reconexión no proporciona una explicación satisfactoria de lo que sucede durante la fulguración porque en el reajuste de las líneas del campo magnético se invierte demasiado tiempo, comparado con la impresionante rapidez con que se libera la energía. Conocedor de la deficiencia del nuevo modelo, Harry E. Petschek, del Laboratorio de Investigación Avco-Everett, en Everett, determinó en 1963 que, bajo ciertas circunstancias, la reconexión procede a un ritmo más rápido que el previsto por Sweet-Parker. El fenómeno estudiado por este investigador se denomina ahora reconexión rápida o de Petschek, para distinguirla de la reconexión lenta descrita por Sweet y Parker.

Ver es creer

Lo mismo en la reconexión lenta que en la rápida, el grosor de la lámina de corriente eléctrica es escaso, apenas unos metros, demasiado pequeño para que los instrumentos que hoy observan el Sol puedan distinguirla. No obstante, ambos procesos dan lugar a un fenómeno importante que sí puede detectarse: la creación de campos magnéticos en regiones muy definidas. ¿Contienen las imágenes indicios de estos campos de las modernas sondas espaciales? Quizá.



4. LOS ARCOS QUE SIGUEN A LA FULGURACION presentan a veces una forma en punta. Esa geometría del gas brillante refleja una constricción del campo magnético local. Los estrangulamientos pueden llevar a una reconexión magnética que encienda una fulguración; en ocasiones permanecen visibles durante los días que siguen a la misma.

YOHKOH (LABORATORIO SOLAR Y DE ASTROFISICA LOCKHEED MARTIN/OBSERVATORIO ASTRONOMICO NACIONAL DE JAPON/UNIVERSIDAD DE TOKIO/NASA/ISAS)

A pesar de que la reconexión podría ser un fenómeno omnipresente en el Sol, ha costado encontrar una prueba directa. No podemos silenciar la contribución de la misión RHESSI. En 2003, Linhui Sui, de la Universidad Católica de América, analizó, mientras trabajaba conmigo en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, las observaciones efectuadas por RHESSI de una fulguración de intensidad moderada, acontecida el 15 de abril de 2002, que presentaba un aliciente especial: provocó una eyección de materia coronal en un ángulo propicio para la observación. Además, la fulguración exhibía una estructura de arco sencilla. Por sus propiedades, parecía una fulguración normal. Sin embargo, Sui apreció una fuente compacta de rayos X débiles flotando por encima del arco magnético, con el que no parecía guardar relación. Intrigados por esa fuente separada, pero reticentes acerca de su existencia, obtuvimos una secuencia de imágenes que cubría desde el principio hasta el final de la fulguración, con una duración de 10 minutos.

Era real. Al principio, la enigmática fuente de rayos X yacía cerca de la parte más alta del arco. Cuando la fulguración empezó a producir rayos X de mayor energía, esa parte más alta del arco descendió; en cambio, la fuente compacta permaneció en su sitio. En el clímax de la fulguración, cuando los rayos X de alta energía alcanzaron el pico de máxima intensidad, el arco cambió de repente de dirección y empezó a ascender. La misteriosa fuente comenzó también a desplazarse hacia arriba, aunque bastante más deprisa; en dos minutos se debilitó hasta desaparecer. Nadie antes había observado algo así. La fuente de rayos X que al principio parecía inmóvil terminó saliendo disparada del Sol a unos 300 kilómetros por segundo, la misma velocidad que la fulguración impartía al material que se expulsaba de la corona. Sui y yo pensamos que por fin habíamos descubierto el origen de las liberaciones explosivas de materia. Por si fuese poco, las mediciones de temperaturas revelaron de dónde procedía la energía: de la zona

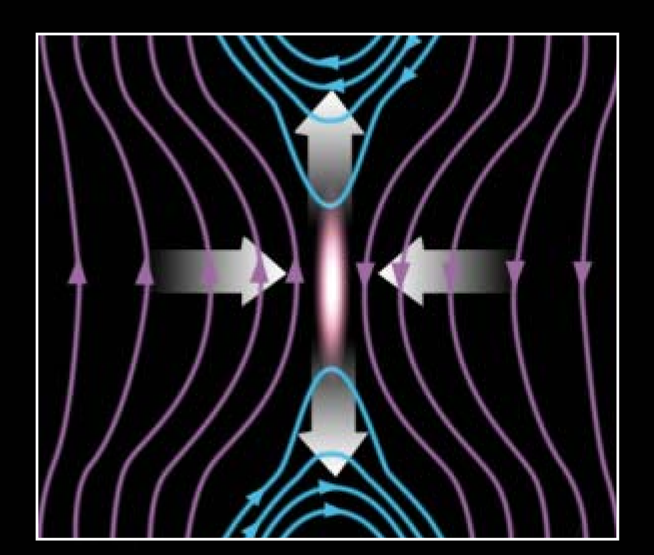
RECONEXION

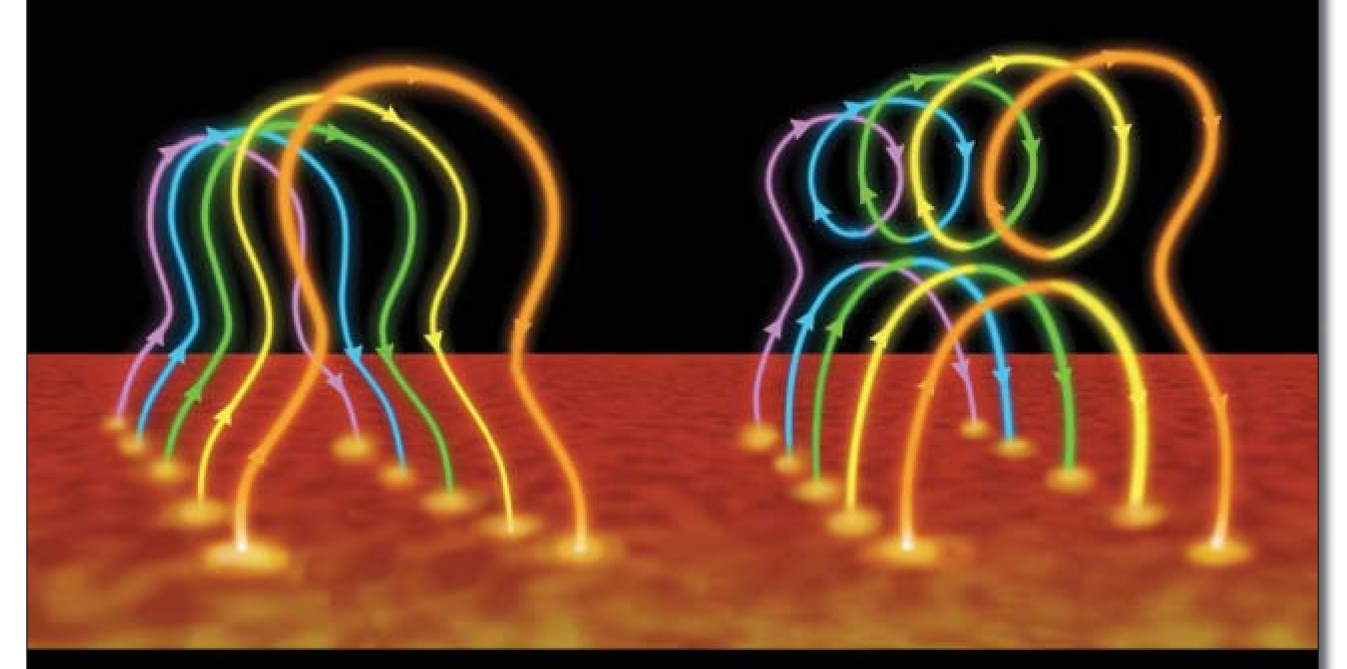
La fuente de energía de las fulguraciones solares es un fenómeno denominado “reconexión magnética”, por el cual las líneas del campo magnético del Sol se unen y reconfiguran rápidamente. La reconexión extrae energía del campo magnético para calentar localmente la atmósfera solar y acelerar las partículas cargadas hasta altas velocidades.

RECONFIGURACION DEL CAMPO

En general, la reconexión magnética se produce al juntar dos campos magnéticos de sentidos opuestos. En el esquema de la derecha, las líneas de campo que apuntan hacia arriba y hacia abajo (*color morado*) se desplazan hacia el centro. Se forma entonces una lámina vertical de corriente eléctrica (*rosa; aquí se la ve de canto*). Los campos de sentidos opuestos pueden fusionarse dentro de la lámina; en parte, se aniquilarán entre sí y liberarán la energía magnética que contienen. Las líneas de los nuevos campos magnéticos (*azul*) se forman por arriba y por debajo de la lámina y se alejan con rapidez del lugar de la reconexión.

En el Sol (*abajo*), estas reconexiones pueden adquirir bastante complejidad. A veces se configuran arcadas solares, una serie de líneas de campo arqueadas, una tras otra. Esas líneas pueden en ocasiones constreñirse a la vez (*abajo a la izquierda*). Si el proceso continúa, terminará en una reconexión general, que dará lugar a una fulguración y dejará tras de sí un campo magnético helicoidal por encima de una arcada baja (*abajo a la derecha, los puntos donde cambia el color denotan la reconexión*). El campo helicoidal y el material que lo contiene podrían expandirse hacia fuera, convirtiéndose en una eyección de masa coronal.



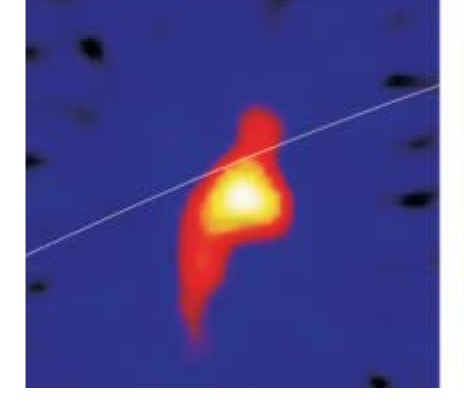
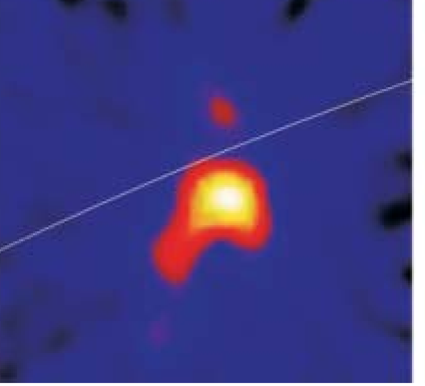
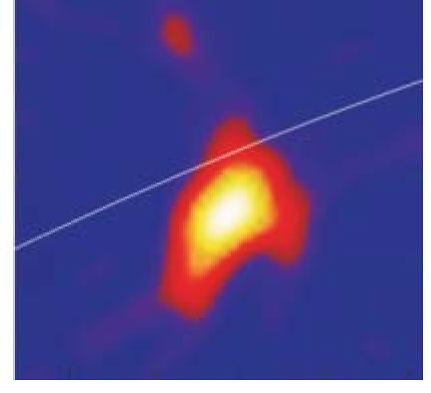




LA PRUEBA QUE SE HIZO ESPERAR

Estas reconexiones dejan tras de sí unas señales que las descubren. La imagen de la izquierda, obtenida por la sonda TRACE en septiembre de 2000, presenta una maraña de arcos que dejaron ver dos horas después de que en esa misma zona ocurriera una fulguración solar. Aunque no se conoce la configuración del campo magnético antes de la fulguración, el amasijo de arcos de la imagen sugiere la presencia de una importante reconexión magnética, que quizá dejó tras de sí partes de campo en buena medida desconectadas de la superficie solar.

DON DIXON (*ilustraciones*); TRACE (*imagen*)

5. LAS FOTOGRAFIAS DE RAYOS X tomadas por el cartógrafo espectroscópico solar de alta energía Ramaty muestran la fulguración del 15 de abril de 2002, que estuvo acompañada por una eyección de materia coronal. Durante la fulguración apareció una fuente de rayos X como un bulto rojo justo sobre el arco principal de gas caliente (*izquierda*) y por encima del borde visible del Sol (*línea blanca*). Esta fuente permaneció inmóvil durante algunos minutos, mientras la parte superior del arco se abatía (*centro*), y luego salió disparada hacia el espacio (*derecha*). Esta secuencia apoya que la causa de las fulguraciones y de las eyecciones de masa coronal consista en una reconexión magnética en la parte superior de los arcos magnéticos: coincide exactamente con lo que ha de esperarse si el campo magnético se reconecta sobre el arco, de modo que la mitad de las nuevas líneas se desplacen hacia abajo, la otra mitad hacia arriba y, de ese modo, se aporte la energía necesaria para la expulsión de materia coronal.

NASA

situada entre el punto más alto del arco magnético y la fuente de rayos X.

Estas circunstancias coinciden con lo que cabe esperar de un campo magnético que se reconecte, por encima de un arco, en una lámina vertical de corriente eléctrica. Parece que el campo magnético de la corona y el plasma fluyen en sentido horizontal hacia las dos caras de la lámina. Los dos campos magnéticos opuestos se reconectan en ésta; la mitad de las nuevas líneas de campo se desplazan con rapidez hacia abajo, donde se apilan sobre arcos magnéticos que ya estaban allí. La otra mitad de las líneas magnéticas reconectadas se precipita hacia arriba, formando un gran arco magnético retorcido, parte del cual no está conectado al Sol. Al menos en algunas fulguraciones, estos arcos retorcidos de campo magnético provocan eyecciones de materia coronal. La reconexión magnética ofrece una vía por la que la parte central de un arco así y la burbuja de plasma en la que reside pueden escapar del Sol, como cuando se cortan de repente los cables que sujetan un globo.

Esta situación que dedujimos del episodio de 2002 vale también para interpretar las anteriores observaciones del Yohkoh. La ojiva observada en la fulguración de 1992 debió de situarse debajo mismo de una lámina invisible de corriente, donde continuamente se formaban nuevas líneas reconectadas que se derrumbaban sobre el campo subyacente. La parte apuntada del arco brilló intensamente en rayos X, debido a la incesante inyección de plasma caliente y de electrones acelerados procedentes de la lámina de corriente y, posiblemente, también por el calentamiento y aceleración de los electrones en la parte apuntada misma.

Diríase que se halla más cerca de nuestra comprensión el origen de algunas fulguraciones solares y de las eyecciones de masa coronal. Quedan, empero, preguntas por resolver. ¿Qué acelera las partículas en las fulguraciones? ¿Qué desencadena la repentina reconexión magnética? Se espera encontrar pronto respuestas a estas preguntas porque se siguen estudiando las fulguraciones con RHESSI y con otros observatorios solares, a los que se incorporarán las sondas Solar B —que deberá partir el 23 de septiembre de 2006 o en los días siguientes— y STEREO, cuyo lanzamiento está previsto para este 22 de julio. Solar B rastreará los campos magnéticos solares con gran detalle. La misión STEREO (acrónimo en inglés de Observatorio de Relaciones Terrestre-Solares) situará dos naves en posiciones desde las que se puedan obtener imágenes estereoscópicas —tridimensionales— del Sol. Se conocerá así mejor el cambio de la geometría de las expulsiones de la materia coronal a medida que abandonan el Sol y atraviesan el espacio interplanetario.

La capacidad de anticipar un clima espacial violento crecerá en los años venideros. El progreso vendrá de dos frentes: un mejor conocimiento de los mecanismos que producen las fulguraciones solares e instrumentos cada vez mejores para observar, sin solución de continuidad, el espacio que rodea al Sol y a la Tierra. Quienes estudiamos las tormentas espaciales esperamos que muchos de los misterios pendientes se resuelvan pronto. Ansiamos el momento en el que las predicciones del tiempo espacial lleguen a sernos tan familiares como el parte meteorológico diario.

El autor

Gordon D. Holman, doctor en astrofísica, investiga en el Laboratorio de Física Solar y Espacial del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA y es coinvestigador del Cartógrafo Espectroscópico Solar de Alta Energía Ramaty (RHESSI).

Bibliografía complementaria

MAGNETIC RECONNECTION. Eric Priest y Terry Forbes. Cambridge University Press, 2000.

EVIDENCE FOR MAGNETIC RECONNECTION IN THREE HOMOLOGOUS SOLAR FLARES OBSERVED BY RHESSI. Linhui Sui, Gordon, D. Holman y Brian R. Dennis en *Astrophysical Journal*, vol. 612, págs 546-556; 1 de septiembre, 2004.

MULTIWAVELENGTH ANALYSIS OF A SOLAR FLARE ON 2002 APRIL 15. Linhui Sui, Gordon D. Holman, Stephen M. White y Jie Zhang en *Astrophysical Journal*, vol. 633, págs. 1175-1186; 10 de noviembre, 2005.

Los efectos ecológicos de las fluctuaciones climáticas

Para entender las interacciones entre el clima y los ecosistemas, no basta la mera descripción de correlaciones entre cambios demográficos y circunstancias meteorológicas. A la teoría de la dinámica de poblaciones le corresponde un papel esencial

Mauricio Lima

El clima influye en múltiples procesos ecológicos. Repercute en la fisiología y la estructura de los ecosistemas, el comportamiento, la demografía y la dinámica de poblaciones. Tamaña diversidad de efectos en diferentes niveles de organización se corresponde con las escalas espaciales y temporales en que varían los fenómenos climáticos.

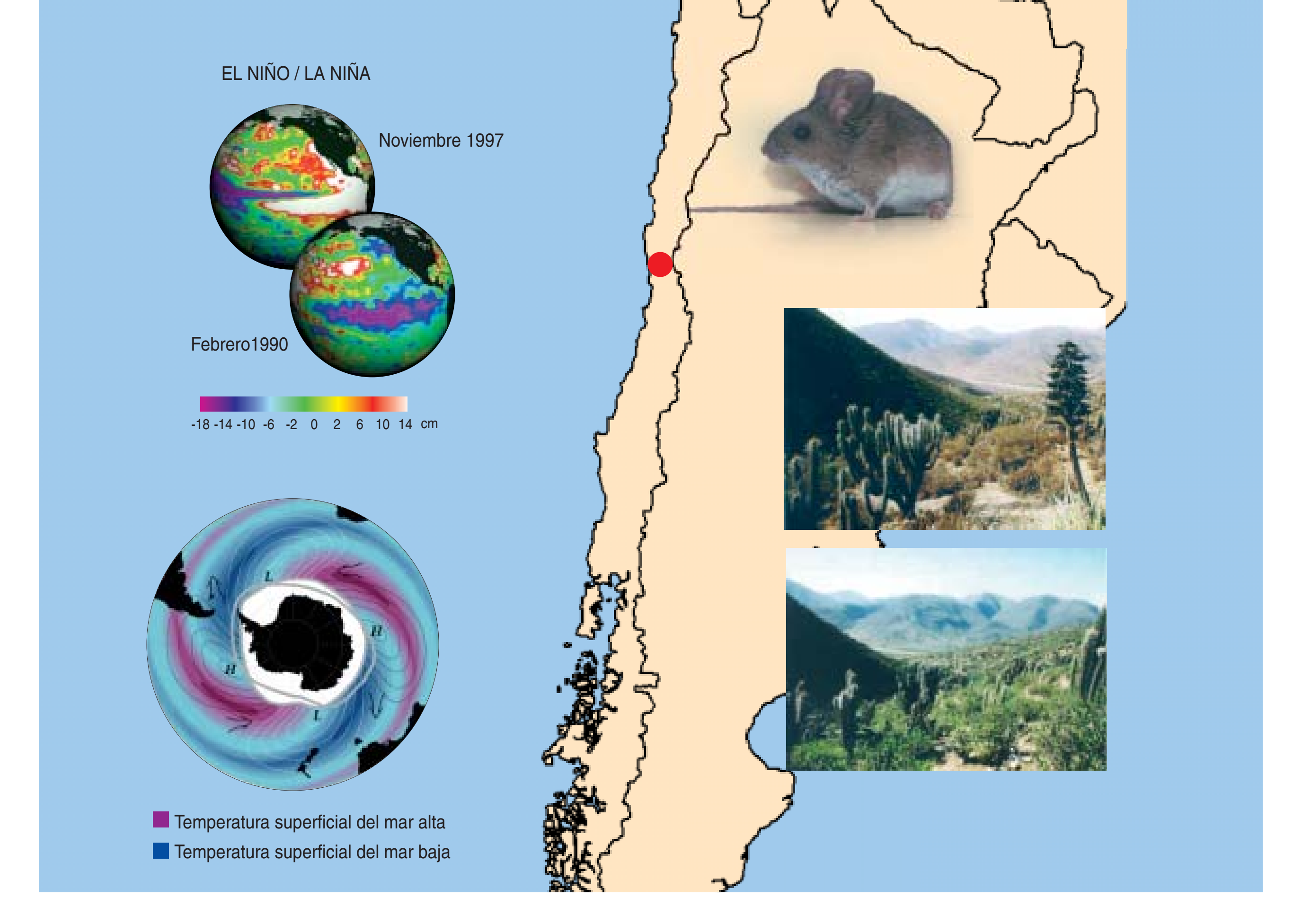
El clima ejerce su influjo más directo a través de los parámetros locales: la temperatura, las precipitaciones, la nieve o las corrientes oceánicas. Los ecólogos acostumbran centrarse en el estudio de las consecuencias de esos parámetros locales. Sin embargo, en los últimos tiempos se ha despertado el interés por conocer las consecuencias de las fluctuaciones climáticas a gran escala sobre los sistemas naturales, se trate de individuos, poblaciones o ecosistemas enteros. En los últimos años han abundado los trabajos sobre los efectos de las perturbaciones de largo alcance en los ecosistemas. Pensemos en la Oscilación del Atlántico Norte o El Niño-Oscilación Austral.

Importa poder predecir los problemas que el cambio climático global podría causarles a los ecosistemas. Para ello resulta imprescindible la colaboración entre climatólogos y ecólogos. Cierto es que la ecología de poblaciones cuenta con una larga tradición en el estudio de los efectos del clima en la dinámica de las poblaciones: Charles Elton apelaba ya en 1924 a los efectos climáticos para explicar las fluctuaciones cíclicas de las poblaciones de lemingos, linces y liebres en el hemisferio norte. No obstante esos ochenta años transcurridos desde entonces, con la atención prestada a los factores climáticos y sus efectos, se echa todavía en falta un marco teórico claro que permita entender mejor el papel de los cambios del clima en los ecosistemas.

Nos ocuparemos aquí del análisis y modelización de los efectos de las perturbaciones climáticas en la dinámica de las poblaciones, un apartado de la ecología todavía poco desarrollado. A modo de prenotando, conviene tener presente, al abordar las correlaciones entre variables climáticas y procesos ecológicos, que correlación no significa causalidad. Las relaciones estadísticas entre el clima y los procesos ecológicos deben tomarse con precaución y escepticismo. Para validar las correlaciones, resulta fundamental una explicación mecanicista del patrón estadístico descubierto. Ahora bien, el nudo de la investigación estriba justamente en dar con un mecanismo que explique la relación observada.

Estructura dinámica de las poblaciones

El uso de modelos para estudiar las fluctuaciones numéricas de las poblaciones naturales viene de lejos. La formulación más general parte del siguiente postulado: el factor en que la población de una especie crece o decrece con el tiempo es una función f, por un lado, de la densidad o tamaño de las poblaciones que interactúan en la misma comunidad y, por otro, de los factores físicos que intervengan. Puede sumarse una variable, con una determinada distribución aleatoria, simbolizada por la letra griega ε, que representará las pequeñas desviaciones estocásticas con respecto al modelo. A ese factor de crecimiento o decrecimiento, o más bien a su logaritmo neperiano, se le llama “tasa per cápita de cambio de la especie”. Se emplean logaritmos porque el logaritmo de la población a lo largo de los años dependerá linealmente del tiempo, con un factor de proporcionalidad que será la tasa per cápita definida logarítmicamente, siempre y cuando la tasa sea constante a lo largo del tiempo.



MAURICIO LIMA

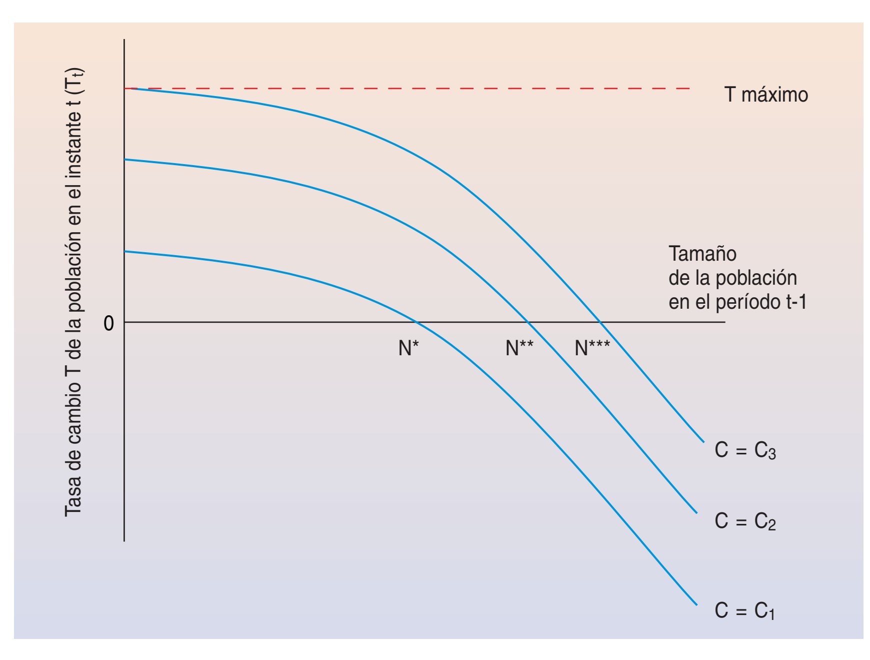
1. EN LA REGION SEMIARIDA del centro-norte de Chile, los recurrentes efectos de El Niño-Oscilación Austral, en combinación con los efectos de la Oscilación Antártica, generan lluvias episódicas que incrementan la productividad vegetal hasta niveles superlativos. Este fenómeno climático influye en la abundancia de diferentes especies de pequeños roedores, en particular el lanchón orejudo de Darwin (*Phyllotis darwini*), al que se ve en la fotografía. El factor climático condiciona la variabilidad temporal de los factores nutricionales (plantas y semillas) que limitan la población de los roedores.

Pero esa tasa no es constante. El estudio de las fluctuaciones poblacionales por medio de series de tiempo trata de determinar la forma de la función *f*, que responderá a los efectos de las densidades pasadas, vale decir, su estructura de retroalimentación. Desde hace unos decenios se han venido desarrollando numerosas aproximaciones metodológicas y analíticas para determinar la dependencia de la tasa en un período dado con respecto de las densidades en períodos anteriores; con otras palabras, la estructura endógena de la dinámica poblacional. Por desgracia, no hemos asistido a un progreso similar en el estudio de los efectos del clima y otros factores exógenos en la dinámica de una población. El único antecedente es el de Tomoo Royama, quien clasificó los efectos de los factores exógenos en tres tipos de categorías: las perturbaciones verticales, las horizontales o laterales y las no lineales.

Efectos verticales de un factor climático

Supongamos que nos encontramos con una población cuya dinámica está dominada por un proceso de primer orden; es decir, por un proceso donde la tasa per cápita de cambio depende sólo de la densidad de la población en el año anterior. En ausencia de otras fuerzas ecológicas, la dinámica de cualquier población viene determinada por la diferencia entre su tasa per cápita de natalidad, *N*, y su tasa per capita de mortalidad, *M*. La población en un período será igual a la del período anterior más *N*-*M* veces ésta. La forma más simple en que una variable climática puede condicionar un proceso dinámico estriba en su modificación de la tasa per cápita de mortalidad o de natalidad. Sea, por ejemplo, el efecto la temperatura media sobre una población de lagartijas; durante los años más cálidos las lagartijas sobreviven y se reproducen mejor que durante los años en promedio más fríos.

Si la dinámica de la población de lagartijas está determinada sólo por su propia evolución endógena y por un efecto exógeno, ligado a las temperaturas medias del período anterior y que actúe de manera homogénea para cualquier densidad de la población, entonces la curva que representa en una gráfica la tasa de cambio poblacional estará determinada sólo por la densidad, pero la posición de esa curva cambiará verticalmente de acuerdo con el valor de la temperatura media en el período anterior. En estas condiciones, la dinámica de una población puede expresarse algebraicamente: suma de una función de la densidad en el período anterior, de una función del clima (temperatura media en ese mismo período anterior) y de la variable aleatoria ε que contiene las desviaciones del modelo. Este tipo o categoría de efectos exógenos, que representa el tipo más simple de perturbación, puede evaluarse con



2. EL CLIMA PUEDE TENER EFECTOS VERTICALES sobre la tasa *T* de crecimiento o decrecimiento de una población. Cuando *T* se representa gráficamente como función del número *N* de individuos que componen en un momento *t* esa población, la curva resultante puede desplazarse, por efecto del clima, hacia arriba o hacia abajo. A medida que las condiciones climáticas se vuelven menos favorables la curva se mueve de C_3 a C_1 y el tamaño poblacional en el equilibrio (donde ni crece ni decrece) pasa de N^{***} a N^*.

independencia de la densidad de la población.

Efectos "horizontales"

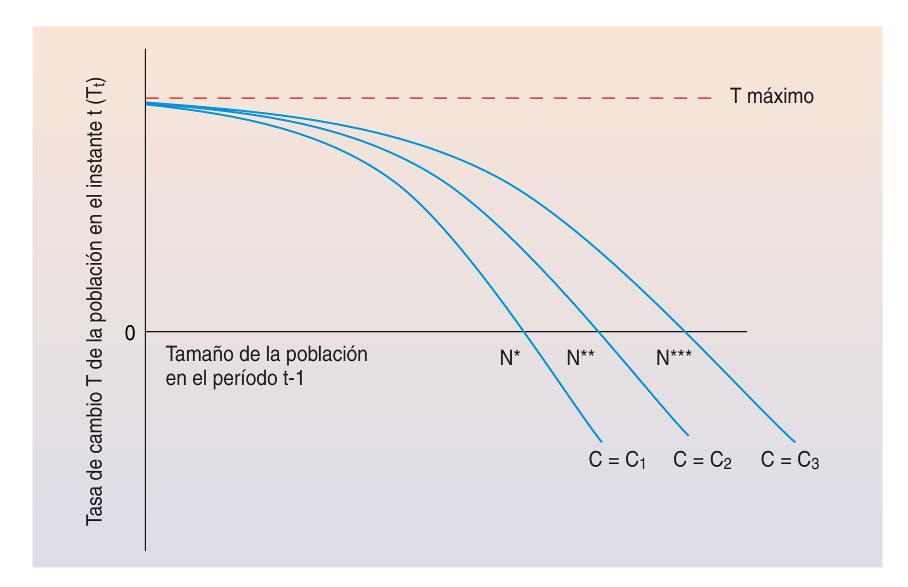
Supongamos ahora que existe un fenómeno climático repercute en un recurso importante, capaz por sí mismo de limitar la población. Valgan como ejemplo ciertos roedores de la zona semiárida del norte de Chile. Para determinado nivel de productividad de plantas y semillas en el desierto, la competencia intraespecífica se incrementa a medida que crece la densidad de la población; la competencia mengua conforme decrece la densidad demográfica. Podemos expresar esa situación a través de un modelo sencillo que incorpora la relación de demanda y oferta en forma de cociente. En el modelo en cuestión, la tasa per cápita de cambio poblacional es una función del cociente de la densidad o tamaño poblacional *N* en el período anterior y de la densidad o tamaño poblacional de las plantas (o semillas), más la variable ε.

Dado cierto nivel de productividad, la competencia aumenta a medida que lo hace *N* y reduce la tasa per cápita máxima de cambio de población. El Niño-Oscilación Austral —calentamiento recurrente de las aguas de la parte ecuatorial del océano Pacífico— genera lluvias inhabituales en los ecosistemas del norte de Chile e incrementa así la productividad vegetal. Por lo tanto, el factor climático (El Niño o las lluvias) influye en la variabilidad temporal del factor limitante, que para los roedores son las semillas y las plantas. En tal caso, podemos sustituir el modelo por otro en el que el factor exógeno (El Niño o las lluvias acumuladas del año) ocupa, en el dividendo del cociente del que depende la tasa de cambio, el lugar de la densidad vegetal. Este nuevo cociente representa la competencia de los roedores por el recurso limitante, que aparece como un elemento condicionado por la densidad poblacional y el estado del clima.

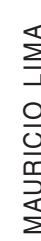
Ilustrado gráficamente, la competencia por el alimento determina la curva de la tasa per cápita de cambio de la población, mientras que el valor anual del factor climático traslada las coordenadas de esa curva lateralmente, a lo largo del eje horizontal, que representa el tamaño poblacional (*véase la figura 2*). Por lo tanto, los años lluviosos asociados a El Niño mueven la densidad de equilibrio hacia la derecha, mientras que los años secos (los años de La Niña, episodio recurrente en que se enfrían las aguas ecuatoriales del Pacífico) mueven la densidad de equilibrio hacia la izquierda (*véase la figura 3*).

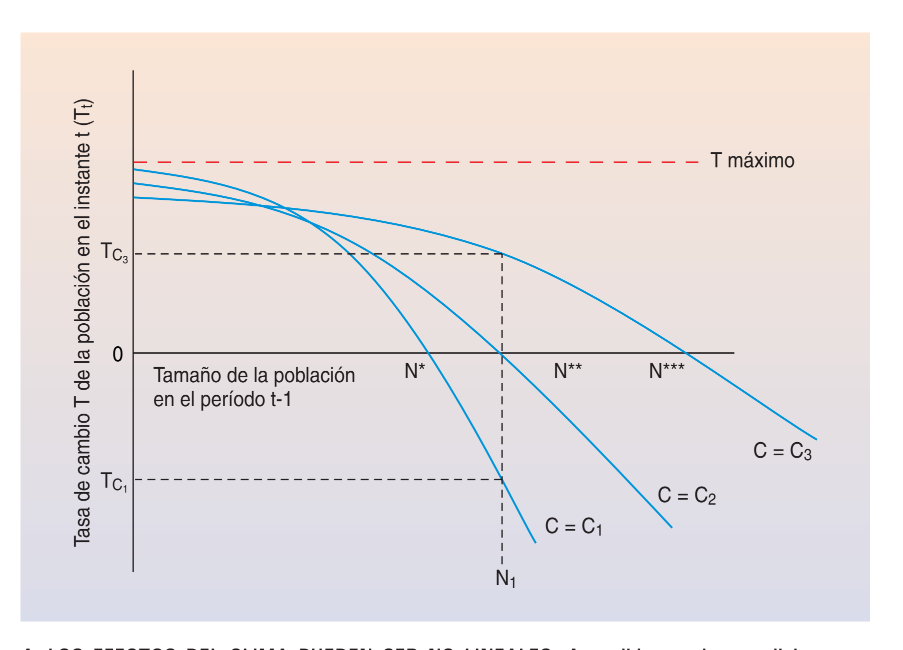
Efectos no lineales

Estos son los efectos climáticos que oponen mayor resistencia a su



3. EL CLIMA TAMBIEN PUEDE TENER EFECTOS LATERALES sobre el ritmo de crecimiento de una población. A medida que las condiciones climáticas se vuelven menos favorables y alteran el factor limitante y el tamaño de la población en situación de equilibrio, la curva se mueve hacia la izquierda, de C_3 a C_1, y el tamaño poblacional en el equilibrio pasa de N^{***} a N^*.





4. LOS EFECTOS DEL CLIMA PUEDEN SER NO LINEALES. A medida que las condiciones climáticas cambian (de C_3 a C_1), se modifica la forma de la curva que representa la tasa T de cambio poblacional y con ella el tamaño o densidad de la población en situación de equilibrio (de N^{***} a N^*). Para un tamaño dado (N_1), la competencia es más intensa (por lo tanto se reduce el valor de la tasa de cambio) en una situación climática C_1 que en una C_3. Con C_1, la tasa va decayendo para poblaciones mayores más deprisa que en la situación climática C_3.

MAURICIO LIMA

modelización. Supongamos que la variable *C* representa la medida de algún factor climático, por ejemplo la Oscilación del Atlántico Norte o la Oscilación Austral, y que las modificaciones experimentadas por esa variable *C* se traducen en modificaciones de la función que representa la tasa de cambio de la población. Por tanto, el efecto de *C* en la curva no consistirá en una traslación a través del plano de la tasa de cambio de la población, sino en una perturbación no lineal (*véase la figura 4*). Para representar tal perturbación podemos atribuir, a cada estado de la variable *C* (el clima) en el período anterior, una función *f* diferente que ligue la densidad de población con su propia tasa de cambio.

Aclarémoslo con un ejemplo. Sea una población depredadora que migra en invierno y cuya densidad de población depende del número de sus presas en el área de invernada, número que a su vez depende de alguna variable climática. Si se multiplican en abundancia los depredadores, limitarán luego el número de sus presas en el hábitat de verano. Y el factor climático, que determinaba la abundancia de presas en la región de invierno, puede tener un efecto no lineal sobre la población de presas en el hábitat de verano del depredador.

La tasa de cambio de la población de presas del hábitat de verano obedecería a una determinada función cuando la variable climática *C* tomase un cierto valor en la zona de invernada y a otra función cuando tomase un valor distinto: si debido a determinado estado del clima durante el invierno hay pocas presas en la región de invernada, la densidad de depredadores será baja, y las presas en la zona de verano estarán limitadas por algún otro factor (comida, nidos, etcétera). Sin embargo, si a los depredadores les fue muy bien en invierno merced a la abundancia de presas, entonces las presas del hábitat de verano podrían estar limitadas por el depredador y exhibir otro tipo de función (*véase la figura 5*).

Colonizaciones "verticales"

Hasta aquí nos hemos ceñido a modelos abstractos, con algún ejemplo para ilustrarlos. Veamos ahora ecosistemas reales que están sujetos a los distintos tipos de efectos climáticos de la clasificación de Royama. Empezaremos por los efectos "verticales".

Cuando cambia la distribución geográfica de una especie, su "rango de distribución", aparecen ejemplos clásicos de efectos verticales del clima sobre la dinámica de las poblaciones. Si consideramos que la tasa per cápita máxima de una población y su relación con la densidad valen como indicadores del espectro de condiciones en cuyo seno una especie puede sobrevivir y reproducirse, los efectos "verticales" (aditivos) de las condiciones ambientales determinarán los intervalos en cuyo ámbito la tasa de cambio de la población toma valores posibles.

La tasa de cambio demográfico depende de la diferencia entre las tasas de natalidad *N* y mortandad *M*; por tanto, los efectos directos del clima en *N*, en *M* o en ambas determinarán la posibilidad de que se extienda o mengüe el rango de distribución de la población. Así, según se ha descrito hace poco, los incrementos de las temperaturas medias anuales debidos al calentamiento global han permitido a diferentes especies colonizar nuevos hábitats; en concreto, ciertas especies de peces han colonizado latitudes más boreales e incrementado su rango de distribución. Se sabe de situaciones semejantes para algunas especies marinas que en el Pacífico Oriental aprovechan los episodios de El Niño para colonizaciones esporádicas.

Entre las perturbaciones verticales del clima podríamos incluir las expansiones geográficas de las enfermedades transmitidas por mosquitos en Asia, Africa Oriental e Iberoamérica. El mismo mecanismo sería el responsable de los incrementos en los rangos de distribución hacia latitudes más polares de diferentes especies de mariposas, aves e incluso de arbustos árticos. Pudieran también considerarse verticales los efectos que la Oscilación del Atlántico Norte ejerce sobre las poblaciones de atunes boreales; el fenómeno determina, de manera distinta en una orilla y otra, las temperaturas y precipitaciones invernales. Los atunes atienden a claves del entorno para maximizar su éxito reproductor (maximizar *N*); las tendencias de la temperatura del océano estarían cambiando la disponibilidad y el ta-

a

CLIMA

INVIERNO

VERANO

b

Tasa de cambio T de la población en el instante t (Tt)

T máximo

0

Tamaño de la población
en el período t-1

N”

C = C”

T máximo

Tamaño de la población
en el período t-1

0

N’

C = C’

5. EFECTOS NO-LINEALES del clima sobre una población de roedores. Un depredador migratorio hace de correa de transmisión de tales efectos. Una especie de ave rapaz migratoria se alimenta de roedores en dos localidades diferentes, una en verano y la otra en invierno. La abundancia de roedores en la región de invernada depende de un factor climático determinado. Por lo tanto, si las rapaces limitan la proliferación de los roedores en su hábitat estival, el factor climático que determina la abundancia de presas el hábitat de invierno puede actuar como un efecto no lineal sobre la población de presas en el hábitat de verano del depredador (*a*). El tamaño de la población de presas del hábitat de verano cambiará según cierta función, cuando el clima de la zona de invernada sea $C = C'$ y conforme a una función diferente cuando el clima sea $C = C''$: si debido a cierto estado del clima durante el invierno hay pocas presas, la densidad de depredadores será baja y las presas en la zona de veraneo estarán limitadas por algún otro factor (comida, nidos, etc.). Pero si los depredadores se multiplicaron en invierno gracias a la abundancia de presas, las presas del hábitat de verano podrían estar limitadas por el depredador y su población crecería o decrecería de otra forma para un tamaño poblacional dado (*b*).

maño de las áreas que les son más favorables.

Otro efecto climático de la misma índole sería el causado por las bajas temperaturas y las lluvias invernales en las ovejas salvajes de las islas escocesas de St. Kilda. Durante los inviernos fríos y lluviosos los individuos ven reducida su capacidad termorreguladora y padecen un desequilibrio térmico; por lo tanto, existiría un efecto directo sobre *D* que haría bajar la curva de la tasa en su representación gráfica.

El Niño y los cambios laterales

No escasean en la bibliografía reciente los ejemplos de efectos laterales del clima sobre diferentes poblaciones naturales. Mencionemos, a modo de botón de muestra, las fluctuaciones de la biomasa o del número experimentadas por ciertas poblaciones de peces marinos. Se han documentado efectos notables de la Oscilación Austral y la Oscilación Pacífica Decenal sobre el reclutamiento de algunas especies de atunes en el Pacífico Tropical. Se llama recluta a la incorporación de nuevas masas de peces a los bancos de pesca.

A este respecto, se ha planteado la hipótesis de que ambas oscilaciones climáticas, al alterar los sistemas de corrientes y la temperatura superficial del océano, provocan que los atunes se encuentren con una distinta disponibilidad de alimento. En particular, los cambios de productividad y de aportación de nutrientes en el Pacífico Ecuatorial durante los episodios de El Niño dan lugar a una perturbación de tipo lateral que afecta a toda la cadena trófica. Un patrón interesante es el que presentan la sardina y la anchoveta en el Pacífico Oriental, en el sistema de la corriente de Humboldt. El Niño causa una reducción importante del alimento que nutre a las anchovetas (constituye, pues, un factor limitante). Aunque parecen favorecer a las poblaciones de sardinas, no están claros los mecanismos asociados con los efectos de El Niño y La Niña.

De forma similar, en los ecosistemas semiáridos de los suelos aleda-



ños a la costa Pacífica de América Austral, en particular en las áreas austral de Perú y centro-norte de Chile, los recurrentes efectos de El Niño-Oscilación Austral generan lluvias inhabituales. Al aumentar entonces la productividad vegetal, crece, en varios órdenes de magnitud la densidad de roedores (*véase la figura 1*). Este ejemplo representa un caso típico de pulsos de productividad que se ajustan perfectamente a la categoría de perturbaciones laterales.

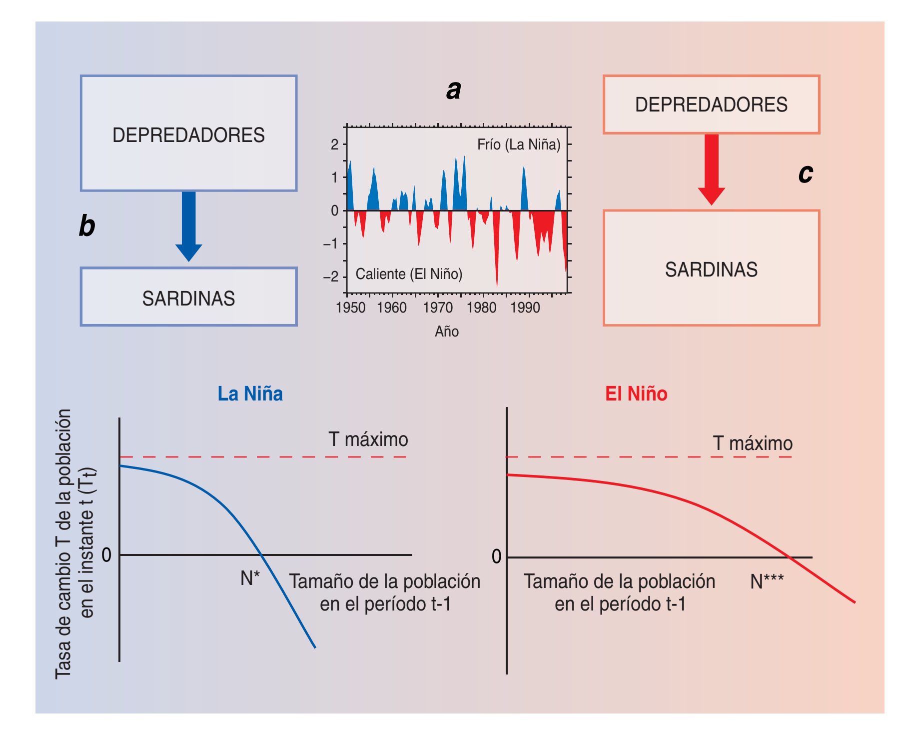
Otro caso interesante es el del pingüino emperador (*Aptenodytes forsteri*). Se sabe que la extensión de la capa invernal de hielo marino repercute en la densidad demográfica de esta ave. Los registros anuales hablan de caída repentina y drástica, a finales del decenio de 1970, de la población con riesgo de desaparición; esa disminución iba asociada probablemente a una reducción en la disponibilidad de alimento, relacionada a su vez con la temperatura superficial del mar. Tenemos, pues, un ejemplo que encajaría en la categoría de los efectos laterales del clima. Se ha informado del mismo tipo de efectos para ciertas aves marinas del Artico, en particular para la especie *Fratercula arctica*. La variabilidad anual en la temperatura del océano condiciona la disponibilidad de la presa principal de esta ave, el arenque (*Clupea harengus*), y su éxito reproductor. De manera similar, los efectos observados de El Niño-Oscilación Austral sobre la población del petrel azul (*Halobaena caerulea*) en el océano Indico austral representarían un caso manifiesto de efectos "laterales".

La no linealidad en peces, alces y lobos

En los efectos no lineales interactúan el clima y el ecosistema, con mayor nitidez que en el resto de los efectos. El clima cambia las reglas del juego entre los individuos de una población, o entre los individuos de poblaciones diferentes (competidores, presas, parásitos o depredadores). Sin ánimo de exhaustividad, citemos algunos ejemplos arquetípicos de esta categoría.

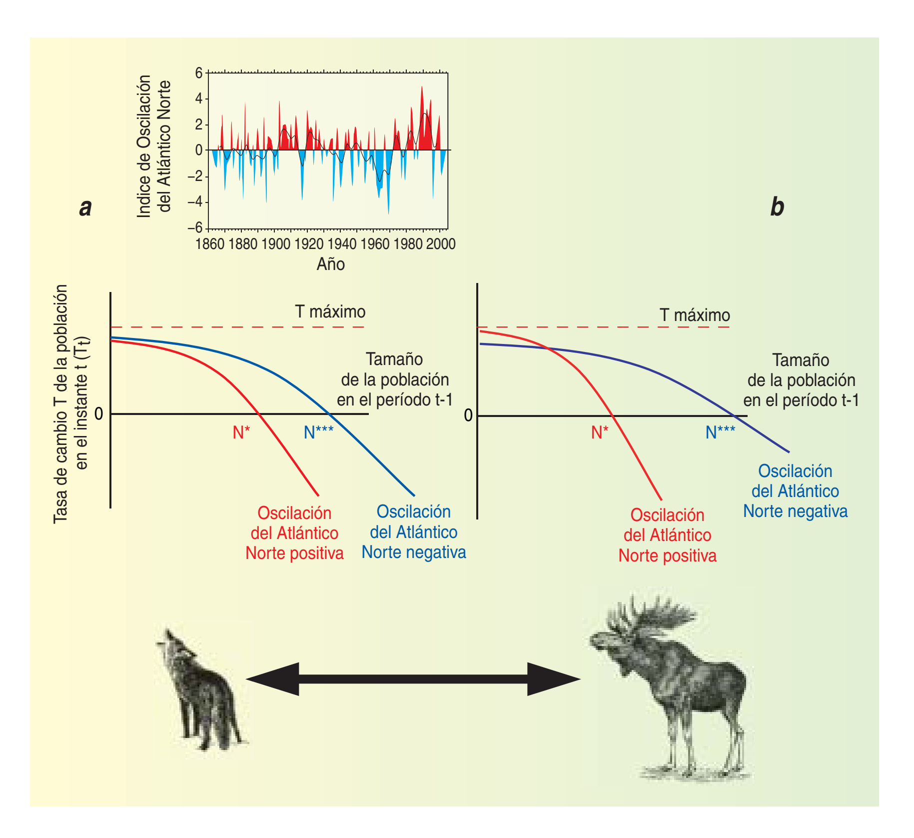
Durante los años cálidos, el abadejo de Alaska (*Theragra chalcogramma*) se lleva a los juveniles cerca de la costa, alejados del hábitat de los adultos. Se incrementa la recluta y decae la intensidad del canibalismo. Por el contrario, durante los años fríos el transporte se reduce, los juveniles y adultos comparten un mismo hábitat y el canibalismo se convierte en el principal determinante del reclutamiento. Por lo tanto, es posible que la forma de la función que da la tasa per cápita del cambio poblacional cambie de los años cálidos a los fríos, ya que la competencia intraespecífica será muy diferente en uno y otro período, al depender del clima el alcance del canibalismo.

Algo similar ocurriría para la población de sardinas (*Sardinops spp*) en el Pacífico Oriental. Durante los años de alta productividad —durante La Niña y en épocas normales—, las poblaciones se hallan limitadas por una intensa depredación de sus huevos, larvas y juveniles, dada la abundancia de depredadores en el sistema de la corriente de Humboldt. En esos períodos de alta productividad, la función de la tasa de cambio de la población se caracteriza por un punto de equilibrio de baja densidad, donde el factor limitante de la población es el espacio libre de depredadores, y el mecanismo regulador, la competencia por ese espacio. Durante los episodios de El Niño, la productividad decae y las sardinas se ven libres de los depredadores (*véase la figura 6*): la población de sardinas alcanza entonces un nuevo equilibrio, dominado por la limitación del alimento, y el mecanismo de regulación es la competencia por la comida. Por lo tanto, El Niño-Oscilación Austral cambia la forma de la función que rige la tasa de cambio de la población, con los consiguientes efectos no lineales.



6. LAS SARDINAS (*Sardinops spp*) DEL PACIFICO ORIENTAL están sujetas a los cambios climáticos asociados al recurrente fenómeno climático El Niño-Oscilación Austral. Durante los años de alta productividad (La Niña y años normales), las poblaciones de sardinas estarían limitadas por la alta mortandad de huevos, larvas y juveniles, debida a la abundancia de depredadores en el sistema de la corriente de Humboldt. Cabe esperar entonces que la tasa *T* de cambio de la población se atenga a una función de la densidad de la población caracterizada por un punto de equilibrio a baja densidad, donde el factor limitante sería el espacio libre de depredadores y la competencia por dicho espacio establecería el mecanismo de regulación poblacional. En los cálidos episodios de El Niño decae la producción primaria y las sardinas se ven más libres de los depredadores. La población de sardinas alcanza entonces un nuevo equilibrio, dominado por la limitación de alimento: el mecanismo de regulación es la competencia por el alimento.

MAURICIO LIMA



7. LA OSCILACION DEL ATLANTICO NORTE tiene un efecto no lineal sobre la dinámica de los alces (*Alces alces*) y lobos (*Canis lupus*) de la isla Royale. Durante los años con valores negativos (*en azul*) de un índice que caracteriza el estado de la Oscilación, los lobos cazan el triple de alces que en los años de valores positivos (*en rojo*), en los que la capa de nieve es menor y las manadas más pequeñas. Desde el punto de vista de los alces, la Oscilación tendría efectos no lineales durante los años de índice positivo (*rojo*): la población de alces estaría limitada por los lobos y regulada por el espacio libre que éstos dejasen, mientras que durante los años de Oscilación negativa (*azul*) estaría limitada por la disponibilidad de alimento y la competencia intraespecífica.

MAURICIO LIMA

Se nos ofrece otro ejemplo en la dinámica de los alces (*Alces alces*) y lobos (*Canis lupus*) de la isla Royale, del Lago Superior, y su relación con el clima, representado por el índice de la Oscilación del Atlántico Norte. Ese índice representa la diferencia entre las presiones atmosféricas medias invernales al nivel del mar en las Azores, Lisboa o Gibraltar y en una estación de Islandia. Durante los años con valores negativos de la Oscilación, la capa invernal de nieve es más gruesa y los lobos cambian su comportamiento de caza. El tamaño de la manada crece. En esos inviernos los lobos cazan tres veces más alces que en los años con valores positivos de la Oscilación, en los que la capa de nieve es menor y las manadas más pequeñas. El clima y el cambio en el comportamiento de caza de los lobos parecen causar, en lo que se refiere a los propios lobos, un efecto lateral, ya que aumentan las presas disponibles.

Durante los años en que son negativos los valores de la Oscilación, los alces experimentarían efectos no lineales de la Oscilación. La población de alces se hallaría limitada por los lobos y regulada por el espacio libre de depredadores. Durante los años en que la Oscilación es positiva, la población estaría limitada por la disponibilidad de alimento y la competencia intraespecífica. En resumen, la condición positiva o negativa del clima, representado por la Oscilación del Atlántico Norte, determinaría dos tipos diferentes de función para la tasa per cápita de cambio de la población. Tendría, pues, efectos no lineales del clima.

En resumen, vemos, pues, que existen interacciones entre los procesos endógenos y exógenos, con un grado considerable de no linealidad, que reflejan la complejidad de los efectos ejercidos por el clima en los ecosistemas. La teoría de la dinámica poblacional, y en particular la clasificación realizada por Royama, facilita mucho el análisis y comprensión de tales efectos.

El autor

Mauricio Lima es licenciado en oceanografía biológica por la Universidad de la República Oriental del Uruguay desde 1985 y doctor en ecología por la Universidad Católica de Chile desde 1998. Se dedica al estudio de la dinámica de poblaciones, la demografía, las series de tiempo ecológicas, la conexión entre modelos y datos y la ecología poblacional aplicada. Actualmente es profesor asociado en el departamento de ecología de la facultad de ciencias biológicas y del centro CASEB de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Bibliografía complementaria

ANALYTICAL POPULATION DYNAMICS. T. Royama. Chapman and Hall; Londres, 1992.

PRINCIPLES OF POPULATION DYNAMICS AND THEIR APPLICATIONS. A. A. Berryman. Stanley Thornes Publishers Ltda.; Cheltenham, 1999.

ECOLOGICAL EFFECTS OF CLIMATE FLUCTUATIONS. N. C. Stenseth, A. Mysterud, G. Ottersen, J. W. Hurrell, K.-S. Chan y M. Lima en *Science*, vol. 297, págs. 1292-1296; 2002.

ECOLOGICAL RESPONSES TO RECENT CLIMATE CHANGE. Gian-R Reto Walther, Eric Post, Peter Convey, Annette Menzel, Camille Parmesan, Trevor J. C. Beebee, Jean-Marc Fromentin, Ove Hoegh-Guldberg y Franz Bairlein en *Nature*, vol. 416, págs. 389-395; 2002.

STUDYING CLIMATE EFFECTS ON ECOLOGY THROUGH THE USE OF CLIMATE INDICES: THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION, EL NIÑO SOUTHERN OSCILLATION AND BEYOND. N. C. Stenseth, G. Ottersen, J. W. Hurrell, A. Mysterud, M. Lima, K.-S. Chan y N. G. Yoccoz en *Proceedings of the Royal Society* B, vol. 270, págs. 2087-2096; Londres, 2003.



LA ENFERMEDAD DE ALZHEIMER borra de forma gradual hasta los recuerdos más asentados de una persona. Se están desarrollando tratamientos alentadores. Ciertas terapias impedirían las segmentaciones moleculares que parecen incoar el proceso patológico. Otras evitarían los efectos nocivos derivados de estas secciones.

Desactivar la enfermedad de Alzheimer

La investigación reciente sugiere estrategias para bloquear los procesos moleculares que conducen a este trastorno neurodegenerativo

Michael S. Wolfe

El cerebro humano vendría a ser un computador orgánico de extraordinaria complejidad. Asimila una amplia gama de experiencias sensoriales, procesa y almacena la información; recupera e integra los bits seleccionados en el momento idóneo. La destrucción provocada por la enfermedad de Alzheimer se ha comparado con el borrado de un disco duro: comienza por los últimos ficheros y se retrotrae hasta los más antiguos.

Uno de los síntomas iniciales de la patología es la incapacidad de recordar sucesos recientes (una conversación telefónica con un amigo, la visita a casa de un técnico de reparaciones) mientras se conserva intacta la memoria de los ocurridos hace largo tiempo. Sin embargo, conforme la enfermedad avanza, los recuerdos viejos, igual que los inmediatos, desaparecen de forma gradual hasta que se es incapaz de reconocer incluso a los seres más queridos. El temor al Alzheimer no radica tanto en una anticipación del dolor físico y del sufrimiento, cuanto en la pérdida inexorable de los recuerdos de toda una vida, la identidad misma de una persona.

Pero la analogía con el computador no es completa. Nadie puede reiniciar el cerebro humano y volver a cargar ficheros y programas. La enfermedad de Alzheimer no se limita a borrar la información, sino que destruye también el propio "hardware" del cerebro, una red de más de 100.000 millones de neuronas que establecen 100 billones de conexiones entre sí. Muchas de las neuronas inutilizadas por este trastorno liberan acetilcolina, un neurotransmisor. La mayoría de los medicamentos actuales para el Alzheimer operan sobre una enzima responsable de la degradación de la acetilcolina; al bloquear dicha enzima, incrementan los niveles del neurotransmisor. El resultado: una estimulación de las neuronas y una mayor claridad de pensamiento. Sin embargo, tales fármacos suelen perder eficacia al cabo de seis meses o un año, porque no logran detener la implacable devastación de las neuronas. Otro medicamento, la memantina, parece ralentizar el empeoramiento cognitivo en pacientes con síntomas moderados o graves de la enfermedad de Alzheimer mediante el bloqueo de la hiperactividad del glutamato (otro neurotransmisor); aunque está por determinar si los efectos del fármaco duran más de un año.

Un decenio atrás, apenas había quienes confiaran en la posibilidad de vencer a la enfermedad de Alzheimer. Se sabía muy poco sobre su mecanismo biológico subyacente; se le suponían unos orígenes y desarrollo enrevesadamente complejos.

La investigación reciente ha comenzado a desentrañar los mecanismos moleculares que desencadenan la enfermedad. Se están explorando varias estrategias para demorar o detener los procesos destructivos. Quizás uno de los tratamientos, o una combinación de ellos, logre impedir la neurodegeneración y frene en seco la enfermedad. Varias de estas propuestas se hallan en fase de ensayo clínico; los resultados preliminares son prometedores. Crece la esperanza entre los expertos.

TINA WEST

La hipótesis amiloide

La enfermedad, descrita hace un siglo por el neurólogo alemán Alois Alzheimer, se caracteriza por la presencia de placas y madejas de proteínas de la corteza cerebral y el sistema límbico, los responsables de las funciones superiores del cerebro. Las placas corresponden a depósitos de amiloide-beta o A-beta, una proteína pequeña; se alojan en el exterior de las neuronas. Las madejas, o marañas, constan de filamentos de la proteína tau; residen en el interior de las neuronas y de sus proyecciones ramificadas (axones y dendritas).

La observación de dichas anomalías desencadenó un debate que se prolongó durante la mayor parte del siglo XX: ¿Son las placas y las madejas las responsables de la neurodegeneración o constituyen meros indicadores de dónde se ha producido la muerte neuronal? A lo largo de los últimos diez años el peso de las pruebas se ha venido desplazando hacia la hipótesis de la cascada amiloide: según ésta, A-beta y tau se hallan íntimamente involucradas en la aparición de la enfermedad de Alzheimer, siendo A-beta la culpable de los pasos iniciales.

A-beta es un péptido de longitud limitada. Lo aislaron y caracterizaron en 1984 George G. Glenner y Cai'ne W. Wong, entonces en la Universidad de California en San Diego. Procede de la proteína precursora del amiloide-beta (PPA). Las moléculas de PPA se alojan en la membrana celular, con una región en el interior de la célula y otra en el exterior. La beta-secretasa y la gamma-secretasa, enzimas secantes de proteínas (o proteasas), crean A-beta a partir de PPA. Este proceso tiene lugar en todas, o casi todas, las células del organismo. Aunque se desconoce la función de dicha transformación, las pruebas disponibles sugieren que forma parte de una ruta de señalización.

Parte de la región A-beta de PPA reside en el interior de la membrana celular, entre las monocapas interna y externa. Dado que las membranas constan de lípidos que repelen el agua, las regiones proteicas que las atraviesan suelen contener aminoácidos hidrofóbicos. Cuando A-beta se escinde de PPA por medio de la beta y gamma-secretasas, y se libera al medio acuoso exterior, las regiones hidrofóbicas de varias moléculas A-beta se unen entre sí para formar pequeños agregados solubles.

A principios del decenio de 1990, Peter T. Lansbury Jr., hoy en Harvard, demostró que en un tubo de ensayo, a concentraciones elevadas, las moléculas de A-beta se agrupaban y generaban estructuras fibrosas que guardaban semejanza con las que aparecían en las placas de la enfermedad de Alzheimer. Ambas estructuras, las agrupaciones solubles y las fibras de A-beta, resultaban tóxicas para las neuronas cultivadas en placas de Petri; las primeras se interponían en los procesos que, en ratones, resultaban fundamentales para el aprendizaje y la memoria.

Esa gavilla de observaciones respaldaba la hipótesis de la cascada amiloide. Pero la prueba más sólida surgió de los estudios realizados con individuos con un riesgo elevado de contraer la enfermedad de Alzheimer: personas portadoras de mutaciones génicas raras que les predestinan a contraer la enfermedad a una edad temprana, normalmente, antes de los 60 años.

En 1991, el grupo encabezado por John A. Hardy descubrió la primera de estas mutaciones en el gen que codifica PPA, una mutación que afecta de forma específica a la región A-beta o a zonas próximas a ella. Poco después, Dennis J. Selkoe, de Harvard, y Steven Younkin, de la Clínica Mayo en Jacksonville, hallaron, cada uno por su cuenta, que estas mutaciones incrementaban la formación de A-beta en general o la de un tipo de A-beta que muestra propensión a la constitución de depósitos. Además, en las personas con síndrome de Down, que portan tres copias del cromosoma 21 en lugar de las dos normales, la incidencia de la enfermedad de Alzheimer era mayor a una edad mediana. Puesto que el cromosoma 21 contiene el gen de PPA, los afectados por el síndrome de Down producen, desde que nacen, cantidades superiores de A-beta; se encuentran depósitos amiloides en su cerebro ya a los 12 años de edad.

Al poco se descubrieron otras conexiones entre la enfermedad de Alzheimer y los genes que regulan la producción de A-beta. En 1995, Peter St. George-Hyslop y sus colaboradores, de la Universidad de Toronto, identificaron mutaciones en *presenilina 1* y *2*, dos genes emparentados causantes de formas precoces y agresivas de la enfermedad de Alzheimer; éstas aparecen cuando el portador llega a los 30 o 40 años.

La investigación posterior demostró que estas mutaciones incrementaban la proporción de A-beta propensa a la formación de agregados. Ahora sabemos que las proteínas que codifican los genes *presenilina* intervienen en la codificación de la enzima gamma-secretasa.

Por tanto, de los tres genes que provocan la enfermedad de Alzheimer a edad temprana, uno codifica el precursor de A-beta y los otros dos especifican componentes de una proteasa que cataliza la síntesis del péptido dañino. Y no sólo eso. Se ha descubierto que los individuos portadores de una determinada variante del gen que codifica la apolipoproteína E (proteína que facilita la unión de péptidos A-beta en las agrupaciones y los filamentos) presentan un riesgo elevado de desarrollar la enfermedad de Alzheimer.

Lo más probable es que la aparición de la enfermedad dependa de un conjunto de factores génicos. De los ensayos realizados sobre ratones se desprende que los factores ambientales pueden también condicionar el riesgo de contraer la en-

Resumen/Vencer el Alzheimer

- Se da por cierto que en la enfermedad de Alzheimer el péptido amiloide-beta (A-beta) desencadena la alteración y la muerte de las células cerebrales.
- Se están desarrollando fármacos que inhibirían la producción de A-beta y terapias que harían que el péptido dejara de dañar las neuronas.
- Se están realizando ensayos clínicos con posibles fármacos para determinar si demoran o suspenden el inexorable deterioro mental que provoca la enfermedad.

fermedad (el ejercicio, por ejemplo, puede reducirlo).

No se sabe todavía con exactitud de qué modo las agrupaciones solubles y los filamentos de A-beta alteran y matan a las neuronas. Por lo que se sabe, los agregados de A-beta inician una cascada de sucesos que incluye la alteración de las proteínas tau en el interior de las células. En concreto, estos agregados modifican la actividad celular de quinasas (enzimas) que incorporan grupos fosfato a las proteínas. Las quinasas afectadas añaden un exceso de fosfatos a tau, que comporta el cambio consiguiente de las propiedades químicas de la proteína y provoca la formación de filamentos retorcidos. Sin que conozcamos la razón, las proteínas tau alteradas matan a la neurona; quizá desbaratan los microtúbulos que transportan proteínas y otras macromoléculas a lo largo de axones y dendritas. Ciertas mutaciones en el gen *tau* generan también filamentos de la proteína tau y causan otros tipos de trastornos neurodegenerativos, amén del Alzheimer. Por tanto, la formación de filamentos tau sería un fenómeno general que conduce a la muerte neuronal, en tanto que A-beta constituiría el iniciador específico de la enfermedad de Alzheimer.

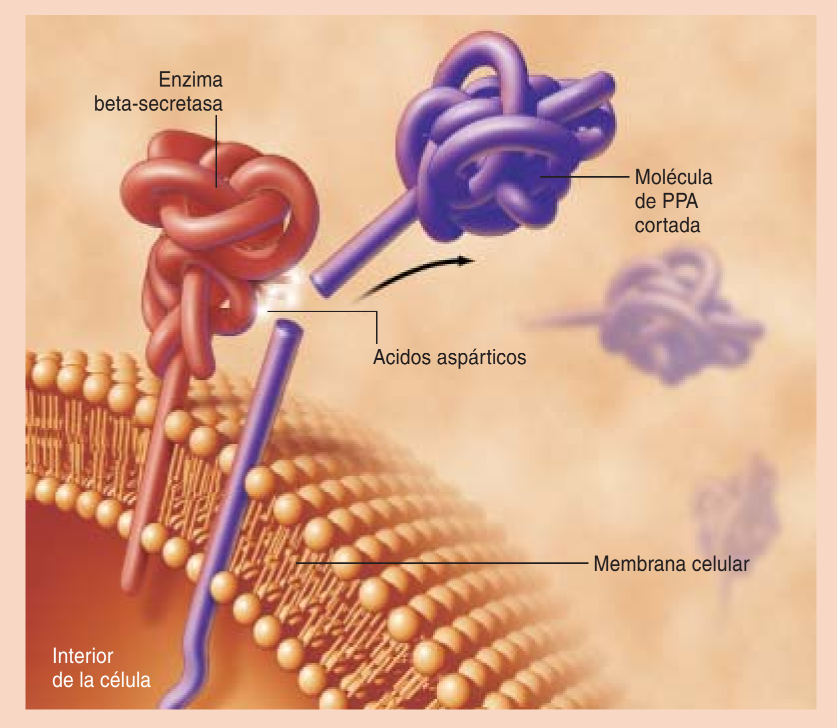
Inutilización de las tijeras moleculares

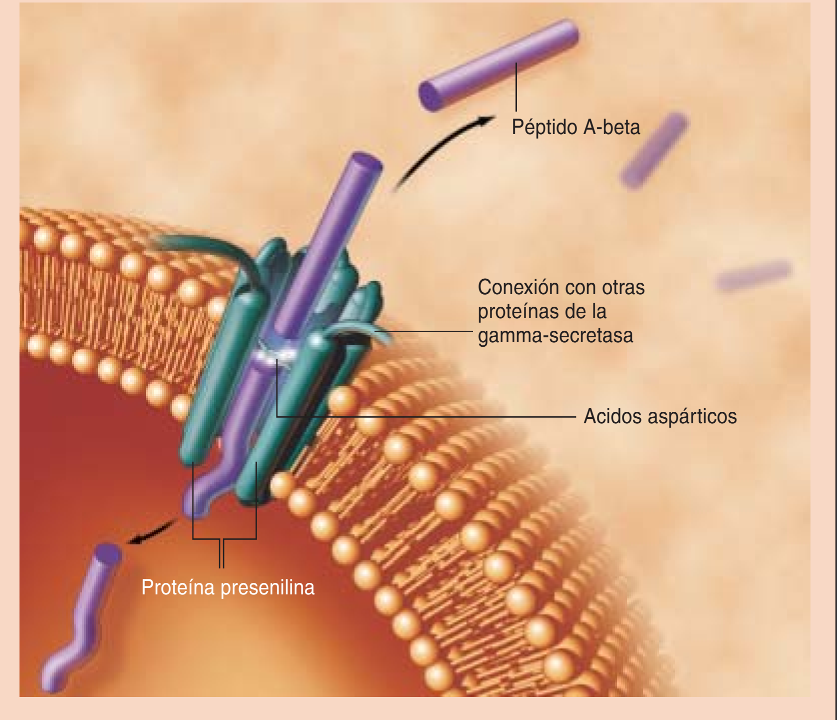
Dada la función fundamental de A-beta en el desarrollo de la enfermedad, las proteasas que catalizan la síntesis de este péptido constituirían excelentes dianas farmacológicas. Los inhibidores de proteasas han mostrado una eficacia notable en el tratamiento del sida, la hipertensión y otras alteraciones. Del arranque de la síntesis de A-beta se ocupa la beta-secretasa, una proteasa que amputa el grueso de PPA, alojado en la parte externa de la membrana celular.

En 1999, un total de cinco grupos de investigación independientes descubrieron la beta-secretasa, enzima que abunda en las neuronas cerebrales. Aunque vinculada a la membrana, esa enzima guarda una estrecha semejanza con un subconjunto de proteasas que residen en los medios acuosos del interior y exterior celulares. Los miembros de este subconjunto —entre los que se

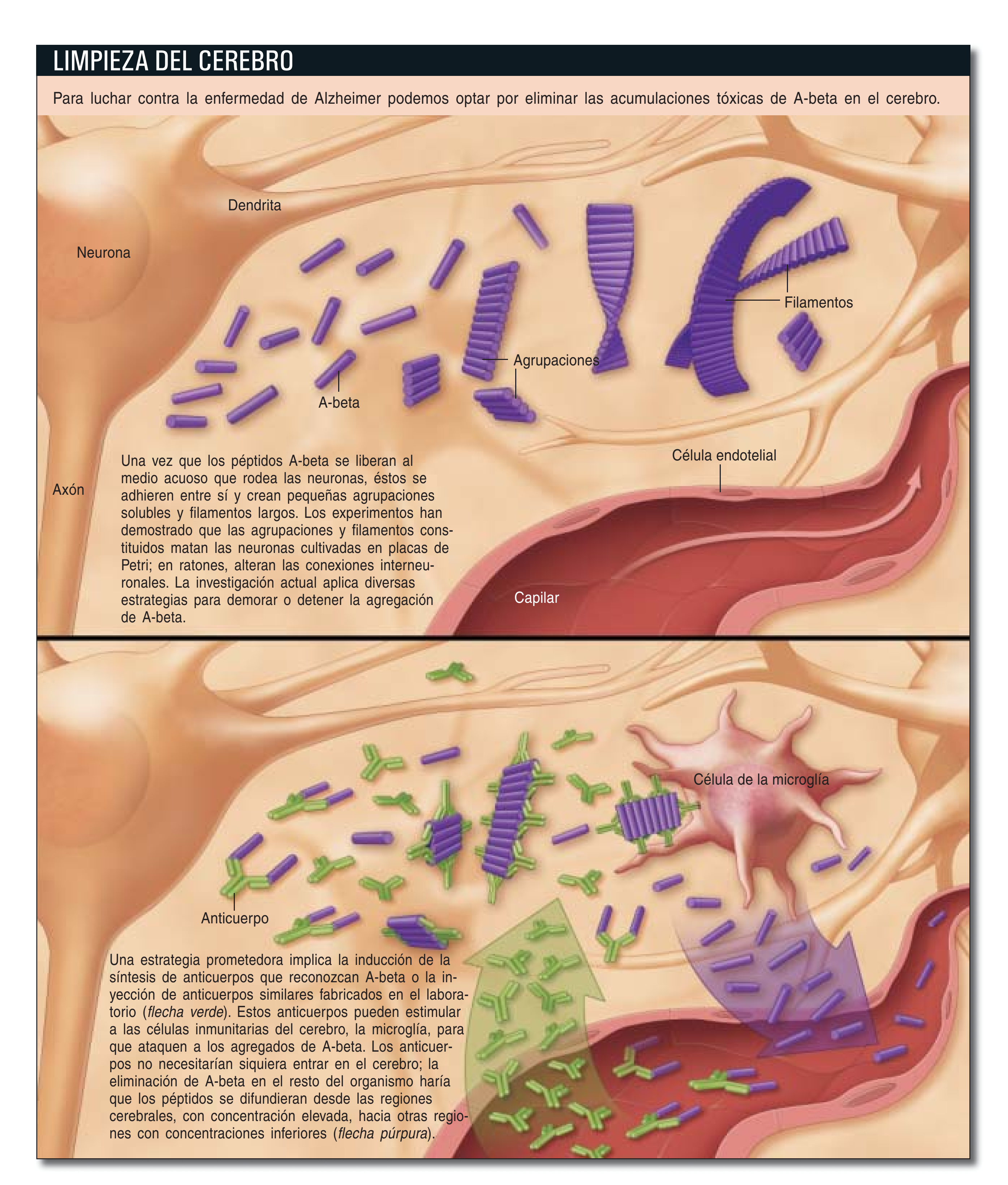
ASI SE SINTETIZA EL AMILOIDE-BETA

Según la hipótesis de la cascada amiloide, la enfermedad de Alzheimer comienza con la acumulación excesiva de amiloide-beta (A-beta), un péptido que se obtiene a partir de la proteína precursora de amiloide-beta (PPA). En la primera etapa (*arriba*), la enzima beta-secretasa corta PPA en la parte externa de la membrana celular con la ayuda de dos ácidos aspárticos, que aumentan la reactividad de la molécula de agua. A continuación, la proteína presenilina, componente de la enzima gamma-secretasa, secciona el muñón que queda en el interior de la membrana, con lo que se libera A-beta (*abajo*). Algunos fármacos potenciales inhiben la actividad de la gamma-secretasa; otros determinan que la enzima corte PPA en un lugar distinto, generando una variante de A-beta más exigua y menos dañina.





TAMI TOLPA



TAMI TOLPA

cuenta la proteasa implicada en la replicación del VIH— utilizan ácido aspártico, un aminoácido, para catalizar la hidrólisis de la proteína. Todas las proteasas emplean agua para segmentar a sus proteínas diana; las aspartil-proteasas se sirven de un par de ácidos aspárticos para activar una molécula de agua con este fin.

El amplio conocimiento acumulado en torno a las aspartil-proteasas permitió adentrarse en la beta-secretasa (miembro de la misma familia de proteasas) y su posible recorte. La estructura tridimensional de la beta-secretasa ha guiado el diseño por ordenador de fármacos inhibidores. Los estudios genéticos sugieren que el bloqueo de la actividad de la enzima no producirá efectos secundarios nocivos; en ratones, la eliminación del gen que codifica la beta-secretasa suprimió la formación

de A-beta en el cerebro, sin provocar daños.

Pero los inhibidores de la beta-secretasa no están todavía listos para los ensayos clínicos. Antes deben desarrollarse compuestos con la potencia y el tamaño reducido necesarios para penetrar en el cerebro. A diferencia de los vasos sanguíneos de otras partes del cuerpo, los capilares del cerebro se hallan revestidos de células endoteliales densamente empaquetadas. Sin apenas resquicios entre tales células, los inhibidores de proteasas deben atravesar las membranas celulares para llegar a los tejidos cerebrales del otro lado; la mayoría de las macromoléculas no logran franquear esta barrera hematoencefálica.

La enzima gamma-secretasa interviene en la segunda etapa de la formación de A-beta: corta el muñón que queda en PPA tras la acción de la beta-secretasa. La gamma-secretasa recurre al agua para seccionar la proteína en el interior de la membrana celular, un medio hidrofóbico. Dos hallazgos resultaron clave para nuestra comprensión de la enzima. En primer lugar, Bart De Strooper, de la Universidad Católica de Lovaina, descubrió en 1998 que la eliminación (mediante ingeniería genética) del gen *presenilina 1* en ratones mermaba la actividad de la gamma-secretasa sobre la proteína precursora del amiloide-beta. De lo que se infería que la proteína presenilina resultaba esencial para la función enzimática. En segundo lugar, en mi laboratorio de la Universidad de Tennessee en Memphis descubrimos que determinados compuestos pertenecientes a la misma categoría química que los inhibidores clásicos de las aspartil-proteasas bloqueaban, en el interior celular, la sección de PPA por la gamma-secretasa. Se sugería así que la gamma-secretasa, lo mismo que la beta-secretasa, cuenta con un par de ácidos aspárticos esenciales para la hidrólisis proteica.

Catapultados por tales hallazgos, avanzamos una hipótesis: la proteína presenilina podría corresponder a una aspartil-proteasa atípica integrada en el tapiz de la membrana celular. Mientras realizaba una estancia sabática en el laboratorio de Selkoe, en Harvard, y en colaboración con Weiming Xia, identificamos en la presenilina dos ácidos aspárticos; demostramos que ambos resultan fundamentales para la acción proteolítica de la gamma-secretasa que genera A-beta. Más tarde, nosotros y otros grupos demostramos que los inhibidores de la gamma-secretasa se unen directamente a la presenilina y que otras tres proteínas integradas en la membrana deben ensamblarse en la presenilina para que ésta acometa la catálisis.

Hoy se admite que la gamma-secretasa constituye el miembro fundador de una nueva clase de proteasas que, al parecer, recurren al agua, en el interior de la membrana celular, para llevar a cabo su función. Es más, los inhibidores de la gamma-secretasa son moléculas pequeñas que atraviesan las membranas y, por ende, la barrera hematoencefálica.

Ahora bien, si esa enzima desempeña funciones esenciales para el organismo, ¿no resultaría perjudicial su bloqueo? El potencial de la gamma-secretasa, en cuanto diana terapéutica, queda atemperado por su papel decisivo en la maduración de células precursoras, sin diferenciar, en diversas partes del organismo: por ejemplo, las células madre de la médula ósea, que acaban por convertirse en eritrocitos y linfocitos. En concreto, la gamma-secretasa corta el "receptor Notch", una proteína de la superficie celular; luego, el fragmento de Notch que se desprende de la membrana y se libera al interior de la célula envía una señal al núcleo, que es quien controla el destino de la célula.

Con dosis elevadas de inhibidores de la gamma-secretasa provocamos efectos tóxicos graves en ratones. Se interrumpe, en efecto, la señal Notch. Tal observación plantea serias dudas contra la administración de esa terapia potencial. Pese a ello, cierto fármaco desarrollado por los laboratorios Eli Lilly ha superado pruebas de seguridad realizadas con voluntarios sanos (ensayos clínicos de fase I). El fármaco se encuentra listo ya para entrar en los ensayos de fase II, con individuos con enfermedad de Alzheimer en fase inicial. Además, se han identificado moléculas que modulan la gamma-secretasa para así bloquear la síntesis de A-beta sin afectar a la sección de Notch. En vez de interaccionar con los ácidos aspárticos de la gamma-secretasa, los moduladores en cuestión se unen a otra región de la enzima, alterando su conformación.

Algunos inhibidores reducen de forma específica la generación de la variante de A-beta más propensa a la creación de agregados; favorecen de ese modo la síntesis de un péptido más corto, que no se agrega con tanta facilidad. El Flurizan, un fármaco de este tipo desarrollado por el equipo que dirige Edward Koo, de la Universidad de California en San Diego, y Todd Golde, de la Clínica Mayo en Jacksonville, ha cosechado resultados alentadores en pacientes que se hallan en las etapas tempranas del Alzheimer. Ha pasado a ensayos clínicos de fase III (la fase más avanzada).

Limpieza de telarañas

Otra estrategia para combatir la enfermedad de Alzheimer consiste en eliminar del cerebro los agregados tóxicos de A-beta, una vez generado el péptido. Ello se consigue mediante inmunización activa; reclama, pues, la intervención del sistema inmunitario del paciente contra A-beta.

En 1999, el grupo encabezado por Dale B. Schenk, de Elan Corporation, se apuntó un éxito trascendental. Descubrieron que la inyección de A-beta en ratones transgénicos que desarrollaban placas amiloides estimulaba una respuesta inmunitaria. Tal respuesta evitaba la formación de placas en el cerebro de juveniles y eliminaba las placas presentes en adultos. Los múridos produjeron anticuerpos que reconocían A-beta; estos anticuerpos parecían inducir, en las células inmunitarias del cerebro (la microglía), que atacaran a los agregados del péptido. Estos resultados positivos en ratones, que incluían mejoras en el aprendizaje y la memoria, condujeron pronto a la realización de ensayos en humanos.

Por desgracia, aunque la inyección de A-beta superó las pruebas iniciales de seguridad, varios de los participantes en los ensayos de fase II desarrollaron encefalitis (inflamación del cerebro). Ello forzó la interrupción prematura del estudio en 2002. El seguimiento de la investigación reveló que la terapia podría haber causado la inflamación al inducir a

BLOQUEO DE LA CASCADA AMILOIDE

Otra de las estrategias en estudio se basa en el bloqueo de las etapas tardías de la cascada amiloide.

Agrupaciones y filamentos de A-beta

Neurona

Neurona

Microtúbulo sano

Microtúbulos

Proteínas tau

Ignoramos de qué modo las agrupaciones y los filamentos de A-beta alteran y matan a las neuronas del cerebro. Cabe presumir que en el proceso intervengan reacciones químicas, desarrolladas en el interior de la célula, que modifican a la proteína tau. En neuronas sanas, las proteínas tau se unen y estabilizan los microtúbulos que transportan macromoléculas a lo largo del axón y las dendritas.

Núcleo

Moléculas reactivas

Quinasas

Entramado de proteínas tau

Grupo fosfato

En pacientes con la enfermedad de Alzheimer, las interacciones entre los agregados A-beta y la neurona podrían liberar moléculas que alterasen la química de la célula. Las enzimas quinasas añaden grupos fosfato supernumerarios en las proteínas tau, haciendo que se despeguen de los microtúbulos y formen filamentos retorcidos y enmarañados que taponan el axón y las dendritas de la neurona. Se están desarrollando sustancias que inhiban la actividad quinasa.

Microtúbulo alterado

Entramado de proteínas tau

las células T del sistema inmunitario a atacar, con agresividad excesiva, a los depósitos de A-beta. No obstante, la producción de anticuerpos contra A-beta se confirmó en numerosos pacientes, que mostraron una ligera mejoría en la memoria y la concentración.

La preocupación acerca de la seguridad de la inmunización activa aconsejó optar por otra vía: la inmunización pasiva, que se apoya en la eliminación del péptido mediante la inyección de anticuerpos. No es muy probable que esos anticuerpos, producidos en células de ratón y modificados por ingeniería genética para evitar el rechazo en humanos, provoquen encefalitis; no deberían desencadenar ninguna respuesta dañina por parte de las células T en el cerebro. Un tratamiento de inmunización pasiva desarrollado en Elan Corporation



ya ha avanzado hasta los ensayos clínicos de fase II.

¿De qué modo la inmunización, pasiva o activa, elimina A-beta del cerebro? Lo ignoramos. No se sabe con qué eficacia los anticuerpos atraviesan la barrera hematoencefálica. Algunos datos sugieren que quizá no sea necesaria su penetración en el cerebro: la desaparición de A-beta en el resto del organismo podría provocar un éxodo del péptido alojado en el cerebro, ya que las moléculas tienden a difundirse desde las regiones donde su concentración es elevada hacia las de concentración inferior. Aunque la inmunización pasiva parece albergar mayores esperanzas, la inmunización activa no está descartada. La investigación de Cynthia Lemere, de la Universidad de Harvard, ha revelado ya que la inmunización sobre regiones seleccionadas de A-beta (y no sobre el péptido completo) insta la acción de las células B, productoras de anticuerpos del sistema inmunitario, pero no la intervención de las células T, responsables de la encefalitis.

Otros investigadores se han inclinado por estrategias distintas de las inmunitarias para detener la agregación de A-beta. Se han identificado compuestos que interaccionan directamente con A-beta y mantienen el péptido disuelto en el fluido que rodea a las neuronas cerebrales, evitando así la formación de agregados tóxicos. Los laboratorios Neurochem, de Quebec, han creado Alzhemed, una pequeña molécula que parece remedar a la heparina, el anticoagulante natural. En la sangre, la heparina evita que las plaquetas se agreguen en coágulos; ahora bien, cuando este polisacárido se une a A-beta, el péptido adquiere una mayor propensión a formar depósitos. Puesto que Alzhemed se une a A-beta en los mismos sitios de unión que ocuparía la heparina, ésta ve bloqueada su función y, por tanto, se reduce la agregación del péptido. El compuesto ha mostrado una toxicidad escasa o nula incluso a dosis elevadas. El tratamiento ha logrado una mejora cognitiva en pacientes con Alzheimer moderado. Los ensayos clínicos de fase III para este medicamento se encuentran avanzados.

Terapias dirigidas contra la proteína tau

Pero el péptido amiloide corresponde sólo a una mitad de la ecuación de la enfermedad de Alzheimer. También la otra mitad, los filamentos tau que tejen la madeja neuronal, constituye una posible diana farmacológica para evitar la neurodegeneración. Los expertos se han centrado en el diseño de inhibidores que bloqueen las quinasas que añaden un exceso de grupos fosfato a la proteína tau, una etapa esencial para la formación de filamentos. Se espera que estos agentes operen en sinergia con los fármacos dirigidos contra A-beta. Sin embargo, de esta línea de investigación no han surgido todavía compuestos aptos para los ensayos clínicos.

Se investiga también en las estatinas, fármacos reductores del nivel de colesterol indicados para mitigar el riesgo de infarto. ¿Podrían combatir el Alzheimer? De los trabajos epidemiológicos se infiere que los individuos que toman estatinas presentan un menor riesgo de padecer Alzheimer. El origen de esta correlación no está del todo clara. Puede que estos fármacos, al disminuir los niveles de colesterol, reduzcan la producción de PPA; o quizás afectan directamente a la generación de A-beta mediante la inhibición de las secretasas implicadas. Los ensayos de fase III determinarán si estatinas como el Lipitor (fabricado por Pfizer) previenen la enfermedad de Alzheimer.

Otro descubrimiento reciente guarda relación con la terapia celular. El grupo liderado por Mark Tuszynski, de la Universidad de California en San Diego, realizó biopsias dérmicas en pacientes con síntomas moderados de la enfermedad de Alzheimer; insertaron el gen que codifica el factor de crecimiento nervioso (FCN) en estas células. Luego, las células genéticamente modificadas se implantaron quirúrgicamente en el prosencéfalo de los pacientes. Se suponía que las células implantadas producirían y secretarían FCN, lo que evitaría la pérdida de neuronas productoras de acetilcolina y mejoraría la memoria. La terapia celular ofrecía una buena alternativa para la liberación del FCN, una proteína de gran tamaño que de otra forma sería incapaz de penetrar el cerebro. Aunque este estudio abarcaba un número restringido de sujetos y carecía de controles relevantes, el seguimiento de las investigaciones mostró que el empeoramiento cognitivo de los pacientes se lentificaba. El éxito del trabajo justificó ensayos clínicos más avanzados.

De entre todas estas terapias potenciales se espera hallar al menos un agente que demore o detenga la pérdida gradual de neuronas cerebrales. Millones de personas se salvarían de la inexorable decadencia que provoca la enfermedad de Alzheimer, amén de crear el marco para que la medicina regenerativa restaure las funciones mentales perdidas.

El tratamiento dirigido contra A-beta puede obstaculizar la aparición del Alzheimer o demorarla si se encuentra en las primeras etapas de su desarrollo, pero no está claro si esta estrategia servirá para curar a los pacientes que se encuentran en fases avanzadas de la enfermedad. Aun así, no faltan motivos para albergar un optimismo moderado. La avalancha de descubrimientos ha convencido a muchos de nosotros de que la búsqueda de formas de prevención y tratamiento de la enfermedad de Alzheimer no será en vano.

El autor

Michael S. Wolfe enseña neurología en el Hospital Brigham y en la Facultad de Medicina de Harvard. En ésta ha instalado un laboratorio de fármacos experimentales contra la enfermedad de Alzheimer.

Bibliografía complementaria

DECODING DARKNESS. Rudolph E. Tanzi y Ann B. Parson. Perseus Books Group, 2000.

HARD TO FORGET: AN ALZHEIMER'S STORY. Charles Pierce. Random House, 2000.

THERAPEUTIC STRATEGIES FOR ALZHEIMER'S DISEASE. Michael S. Wolfe en *Nature Reviews Drug Discovery*, vol. 1, págs. 859-866; noviembre de 2002.

Los grandes telescopios

La versión astronómica de la ley de Moore establece que los telescopios doblan su tamaño cada pocas décadas. Pero los ingenieros creen que podrán construir un telescopio tres, cinco e incluso diez veces mayor de aquí a diez años

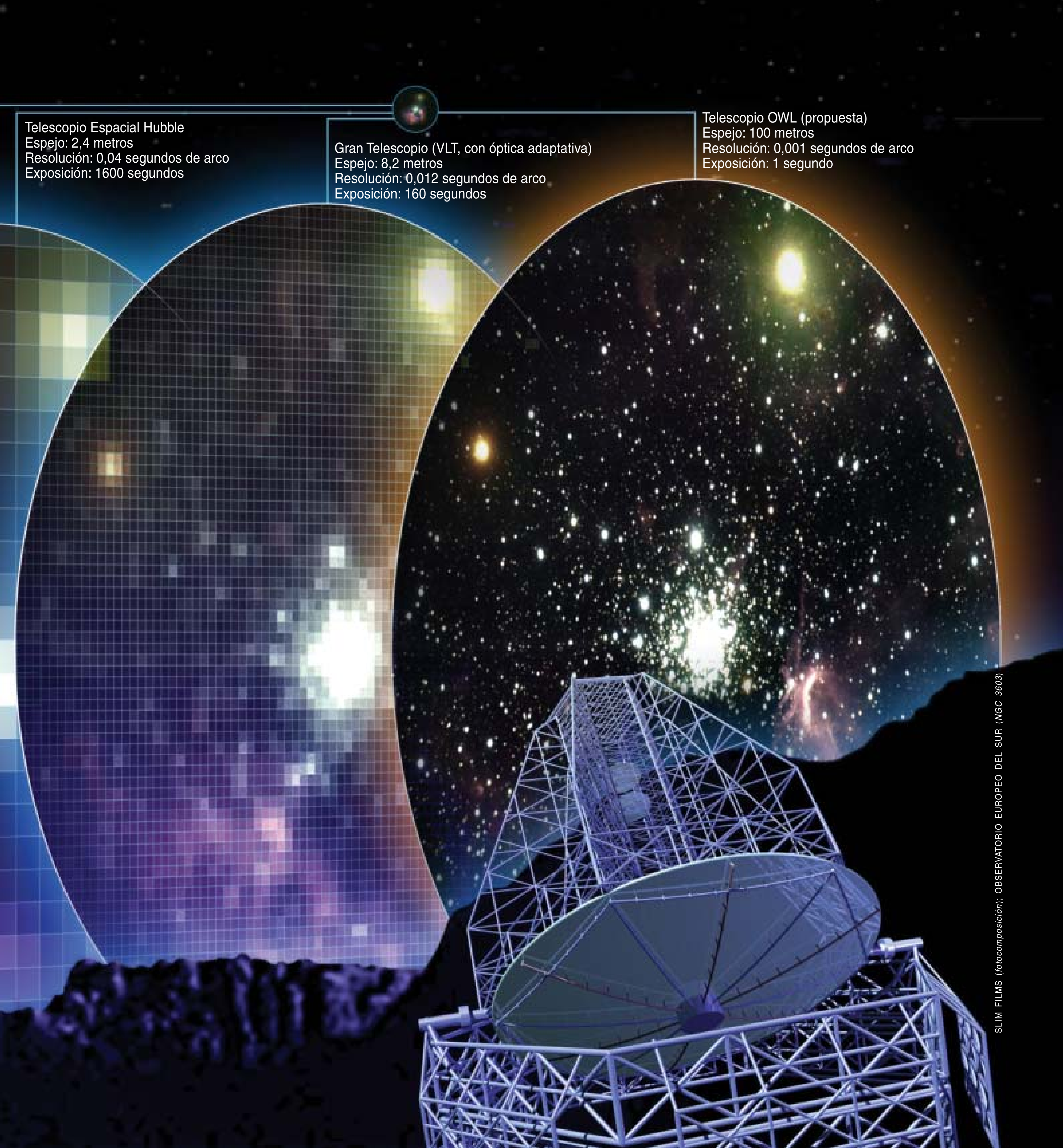
Roberto Gilmozzi

Gran Telescopio (VLT, sin óptica adaptativa)
Espejo: 8,2 metros
Resolución: 0,4 segundos de arco
Exposición: 620 segundos

Vivo algunos de mis mejores momentos en el Observatorio de Paranal cuando, por la noche, tras un día de trabajo, subo a "la cubierta"; así llamamos a la plataforma donde se asientan los cuatro telescopios de 8 metros de diámetro que, combinados, constituyen el Gran Telescopio (*Very Large Telescope*, VLT). Una sensación mágica me embarga: la vastedad del cielo estrellado, los suaves movimientos de las cúpulas, el placer de fumar una pipa, el oscuro desierto de Atacama apenas visible contra el débil resplandor del horizonte. Mientras contemplo el VLT, el conjunto de telescopios más avanzado del mundo, y sus 430 toneladas de maquinaria rotan silenciosamente al unísono con los cielos, pienso en lo afortunado que soy de formar parte de un proyecto tan asombroso. Es un logro de toda la humanidad. Al igual que los otros grandes telescopios de nuestro tiempo, el Observatorio Keck, el telescopio espacial Hubble o la "Gran Red", el VLT incorpora la técnica más depurada que nuestra civilización ofrece hoy por hoy. Si se desglosara la génesis de cada uno de sus componentes, encontraríamos que, en última instancia, fueron millones de personas quienes lo hicieron realidad.

DE INDISTINTA MANCHA DE LUZ A CENTELLEANTE PEDRERIA CELESTE. Un telescopio de gran tamaño equipado con óptica adaptativa tiene una visión más perfecta que el telescopio espacial Hubble. (Esta simulación se basa en una imagen del infrarrojo cercano de la región de formación estelar NGC 3603, tomada con el Gran Telescopio de Cerro Paranal.)

del futuro



SLIM FILMS (*fotocomposición*); OBSERVATORIO EUROPEO DEL SUR (*NGC 3603*)

Pero los astrónomos no descansamos nunca. Apenas hubo terminado la construcción del VLT, ya estábamos muchos pensando en sus sucesores, en telescopios con espejos principales de 25,30 e incluso 100 metros de diámetro. Me he comprometido de lleno en uno de esos proyectos. Su nombre, OWL, alude a los búhos —*owl* en inglés—, por su magnífica visión nocturna, y a la vez es acrónimo de *o*ver*w*hel*mingly* *l*arge, “de tamaño abrumador”. Su espejo de 100 metros ocuparía casi toda la plataforma de Paranal.

Como cualquier nuevo instrumento científico, los actuales telescopios de 8 a 10 metros no sólo permiten dar respuesta a las preguntas para las que fueron construidos, sino que suscitan también otras más profundas y difíciles, que exigen instrumentos aún mayores. El análisis de la composición química de los planetas de tipo terrestre en otros sistemas estelares y la búsqueda de señales de vida; el estudio de las primeras galaxias del universo; el conocimiento de la naturaleza de la materia y la energía oscuras; la obtención de imágenes de la inmensa multitud de cuerpos de nuestro sistema solar que no se están investigando *in situ* por naves espaciales: todo ello requiere una nueva generación de telescopios ópticos gigantes, cientos o miles de veces más potentes de lo que hoy es posible. Varios organismos europeos consideran que no hay en astronomía otra prioridad que la de un telescopio de esas características. Para la Academia Nacional de las Ciencias de Estados Unidos sólo cede el puesto al sucesor del Hubble, el telescopio espacial James Webb. Se han planteado varios proyectos, entre ellos el OWL, el telescopio de 30 metros (TMT) y el telescopio Gigante de Magallanes, de 24 metros (GMT).

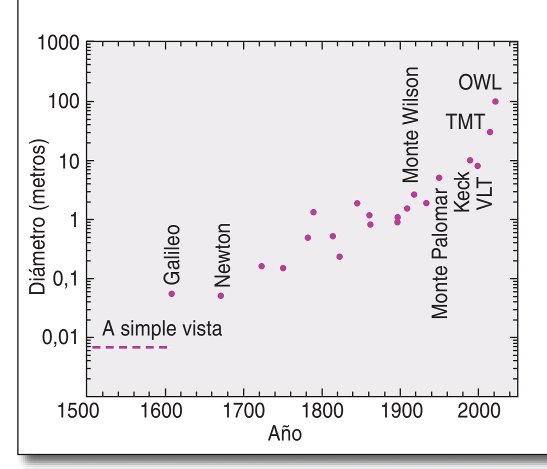
Históricamente, los telescopios han seguido su propia versión de la ley de Moore: cada generación de telescopios duplica el tamaño de la anterior y se tarda décadas en construirlos. Vemos encarnada esa tendencia en la “progresión californiana” del siglo XX: el telescopio Hooker de 2,5 metros de Monte Wilson (1917), el telescopio Hale de 5 metros de Monte Palomar (1948) y los telescopios gemelos Keck de 10 metros, en Mauna Kea, Hawai (1993). Según esta secuencia, el telescopio de la siguiente generación debería medir 20 metros de diámetro y empezar a funcionar hacia el año 2025. ¿Estamos locos quienes proponemos telescopios de 25 metros, e incluso de 100, para mediados del próximo decenio? El examen detallado de las dificultades que representa la construcción de un telescopio de esas características avala nuestra cordura. Nos acucia la necesidad de mayores instalaciones telescópicas sobre la superficie de la Tierra. Y en su mayor parte, ya disponemos de la técnica necesaria para construirlos.

Margen para mejorar

Una razón de peso para intentar superar la ley de Moore telescópica es la escasez de otras opciones cuando se trata de mejorar la capacidad colectora de fotones de los instrumentos astronómicos. En un telescopio reflector, la luz rebota primero en el espejo primario, golpea después el secundario y de ahí sale dirigida a un foco situado en un lugar conveniente, donde se podrá verla a ojo, tomarle una fotografía o separarla en un arco iris para su estudio espectroscópico. Cuando los astrónomos hablan del tamaño de un telescopio se refieren al diámetro del espejo primario. Al duplicar el diámetro podemos ver

LA LINEA CRONOLOGICA DE LOS TE

Los telescopios que se están proyectando, como el OWL y el TMT, continuarían la tendencia histórica de aumentar la abertura.



cuerpos celestes con sólo un cuarto del brillo que antes podíamos captar, o cuerpos del mismo brillo que antes pero situados a doble distancia.

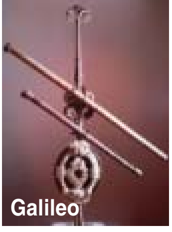
Durante los últimos 50 años, los telescopios han ido siendo más sensibles a los objetos débiles, no sólo por el aumento del diámetro, sino también porque los detectores han mejorado mucho. Al telescopio Hale de 5 metros se le equipó con placas fotográficas que apenas registraban un pequeño porcentaje de la luz que recibían. Hoy día, los detectores electrónicos presentan una eficiencia de casi el cien por cien; tal mejora en la sensibilidad equivale a que se hubiese quintuplicado el diámetro. A efectos prácticos, pues, la potencia de generación actual de telescopios decuplica la de la precedente. Para progresar hoy otro tanto, cuando apenas cabe mejorar la sensibilidad de los detectores, tendríamos que hacer telescopios de 100 metros de diámetro.

Los responsables de los diseños de futuros telescopios han mantenido un animado debate sobre el mayor diámetro que, dentro de lo razonable, podría construirse, pero nadie duda de la necesidad de que la próxima generación deberá crecer más de lo acostumbrado. Tradicionalmente, el tamaño de un telescopio nuevo ha venido fijada por lo que era posible en la fabricación, conformación y pulido del espejo. La luz visible tiene una longitud de onda más corta que las ondas de radio: aunque las antenas de radio son enormes, los

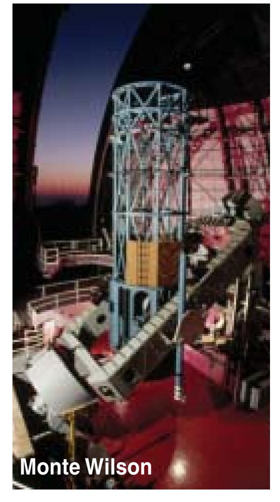
Resumen/Telescopios gigantes

- En astronomía el tamaño importa. Los grandes telescopios pueden detectar objetos más débiles y obtener imágenes más precisas. Los mayores telescopios del momento que operan en luz visible e infrarroja cercana tienen espejos de 8 a 10 metros. Ahora se está proyectando la próxima generación, con diámetros entre 20 y 100 metros.
- Aunque ubicados en la superficie, los telescopios estarán equipados con óptica adaptativa para deshacer los efectos de la distorsión atmosférica. Producirán imágenes más definidas que las del Telescopio Espacial Hubble, y por menos dinero. Los nuevos instrumentos podrán buscar planetas terrestres y analizar su composición química.

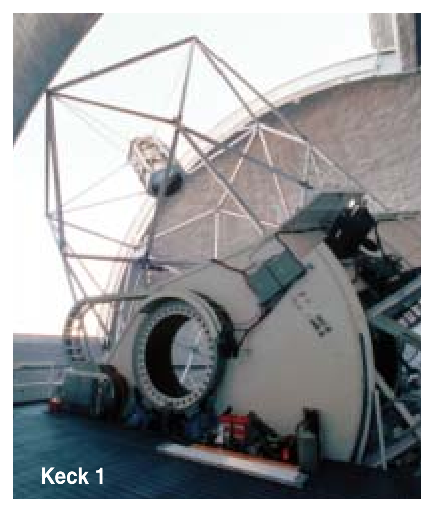
MELISSA THOMAS











GUSTAVO TOMSICH *Corbis (Galileo)*; JIM SUGAR *Corbis (Newton)*; ROGER RESSMEYER *Corbis (Mt. Wilson, Mt. Palomar y Keck 1)*

requerimientos son menos exigentes que en los espejos ópticos, de la misma forma que se necesita un control motor más fino para sujetar un grano de arena entre los dedos que para agarrar una piedra.

El telescopio Hale de 5 metros tiene un espejo paraboloide con una precisión superficial de 50 nanómetros. Si abarcara el océano Atlántico, el relieve más alto mediría apenas 5 centímetros. Para pulirlo, los constructores emplearon una herramienta de madera recubierta con brea; en las últimas fases, incluso pulieron a mano algunas partes del espejo. La tarea duró 11 años (hay que tener en cuenta que la Segunda Guerra Mundial ocurrió en ese tiempo); mientras, se realizaron cada dos años medidas de control de la forma del espejo.

Hoy día se da forma a los espejos bajo el control de un ordenador, que acorta mucho la obra. Cada uno de los cuatro espejos de 8,2 metros del VLT se pulió en un año, con frecuentes comprobaciones de su perfil. La calidad de la superficie iguala e incluso supera la del telescopio Hale, si bien la forma (de hiperboloide, para unos focos más nítidos) es mucho más compleja. El pulido de los espejos no supone el principal escollo.

El mayor problema estriba en la propia fabricación de los espejos. Para fundir piezas de cristal de ocho metros de diámetro hay que construir una fábrica dedicada sólo a esa tarea y superar un duro proceso de aprendizaje: no es raro que haya que fabricar o que se rompan varios espejos antes de conseguir el definitivo. Los métodos actuales no permitirían ni siquiera una duplicación de la escala. Por fortuna, el astrónomo italiano Guido Horn D'Arturo encontró la solución en 1932: el espejo segmentado. Los espejos de los telescopios gemelos Keck, por ejemplo, son mosaicos de 36 segmentos hexagonales de 1,8 metros de diámetro. Gracias a esa forma hexagonal se los puede juntar para completar una superficie hiperbólica. Cada segmento tiene un perfil ligeramente distinto, dependiendo de la distancia a que se encuentre del centro del espejo. En principio, este diseño puede repetirse a cualquier tamaño. El punto negativo es que las piezas han de alinearse con una precisión más fina que la longitud de onda de estudio, con el fin de minimizar en las imágenes el efecto de las juntas entre segmentos y de mantenerlos unidos pese al viento.

Al igual que el Keck, los proyectos OWL y TMT contarían con segmentos hexagonales. Los diseñadores del GMT han seguido una ruta diferente: para evitar los aspectos negativos de la segmentación, han preferido fabricar menos segmentos pero de mayor tamaño. Su telescopio contaría con un mosaico de siete espejos circulares de 8,4 metros de diámetro cada uno (el primero de los cuales se halla en fase de fabricación para probar los fundamentos del proyecto). El inconveniente del modelo estriba en la dificultad de trasladarlo a una escala diferente.

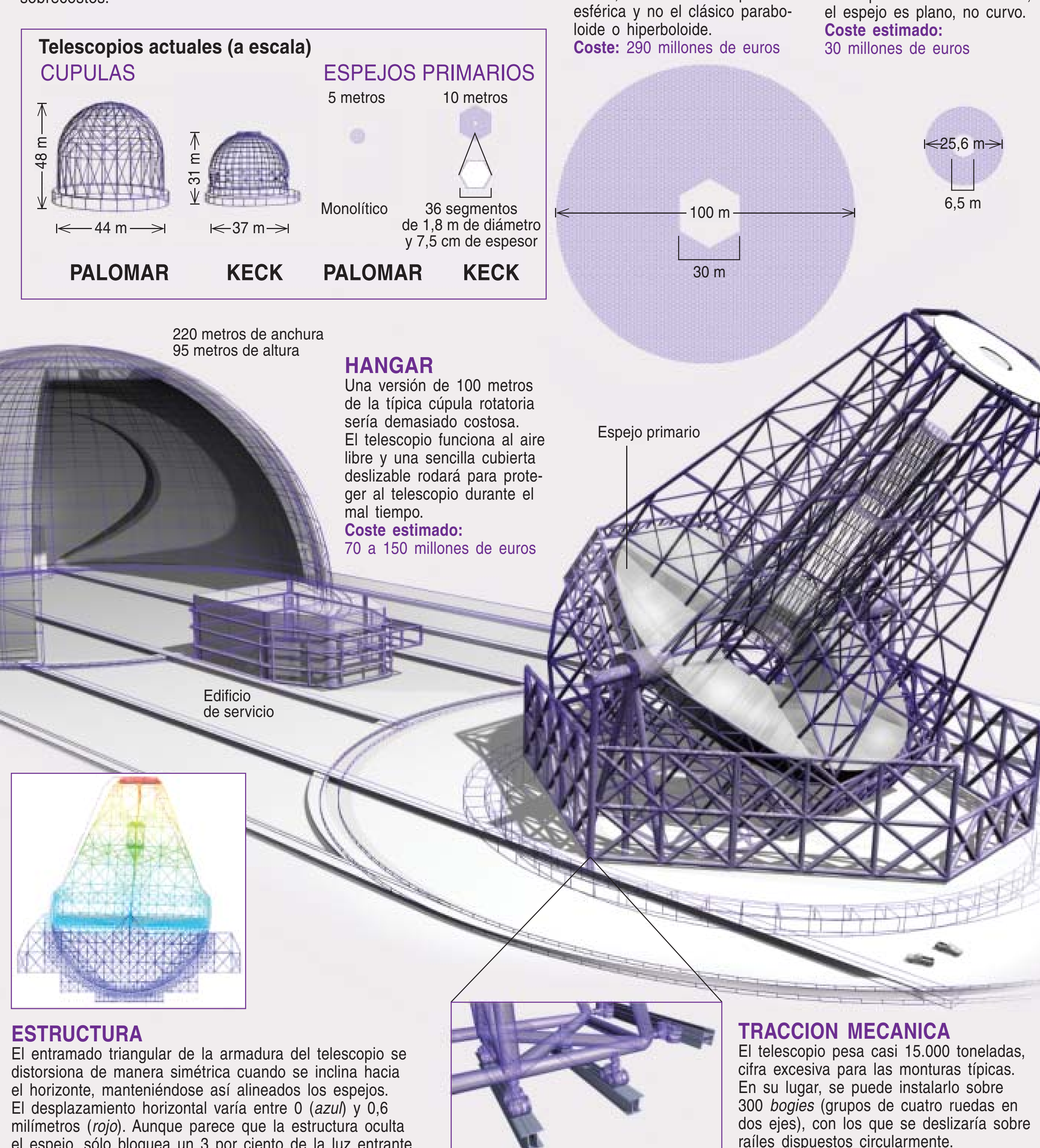
La búsqueda de la visibilidad

La sensibilidad ante los objetos débiles es sólo una de las características deseadas en un telescopio. Importa también el poder resolutivo, o capacidad de distinguir los detalles finos. En principio, un gran telescopio debe proporcionar sensibilidad y resolución. Cuanto mayor es el telescopio, menos degradará sus imágenes la difracción, el emborronamiento que se produce cuando las ondas entrantes quedan cortadas por el borde externo del espejo. Hasta hace poco, sin embargo, la difracción carecía de consecuencias en los telescopios ópticos terrestres. Incluso en los lugares más claros, la turbulencia del aire emborrona cualquier detalle inferior a 0,3 segundos de arco. Si miramos la estrella gigante Betelgeuse (0,05 segundos de arco de diámetro) a través del telescopio de cinco metros de Monte Palomar, todo lo que se aprecia, pese a los 100 millones de dólares que costó, es un punto centelleante de luz roja, una imagen más brillante pero no más clara que la que nos ofrecería un telescopio de 20 centímetros y 300 euros, o incluso la que percibiríamos a simple vista.

Los telescopios orbitales padecen el problema opuesto. Producen imágenes espectaculares con una alta resolución, pero carecen de sensibilidad para detectar los cuerpos más débiles, y menos aún para dividir su luz en

EL DISEÑO DEL OWL

El diámetro de un telescopio de 100 metros decuplicaría el del mayor instrumento óptico que se haya construido hasta ahora. Gracias a diversas innovaciones, no costaría más de mil millones de euros; sería más barato que un telescopio espacial. Ese precio incluye los detectores, la infraestructura y una cantidad adicional para absorber sobrecostos.



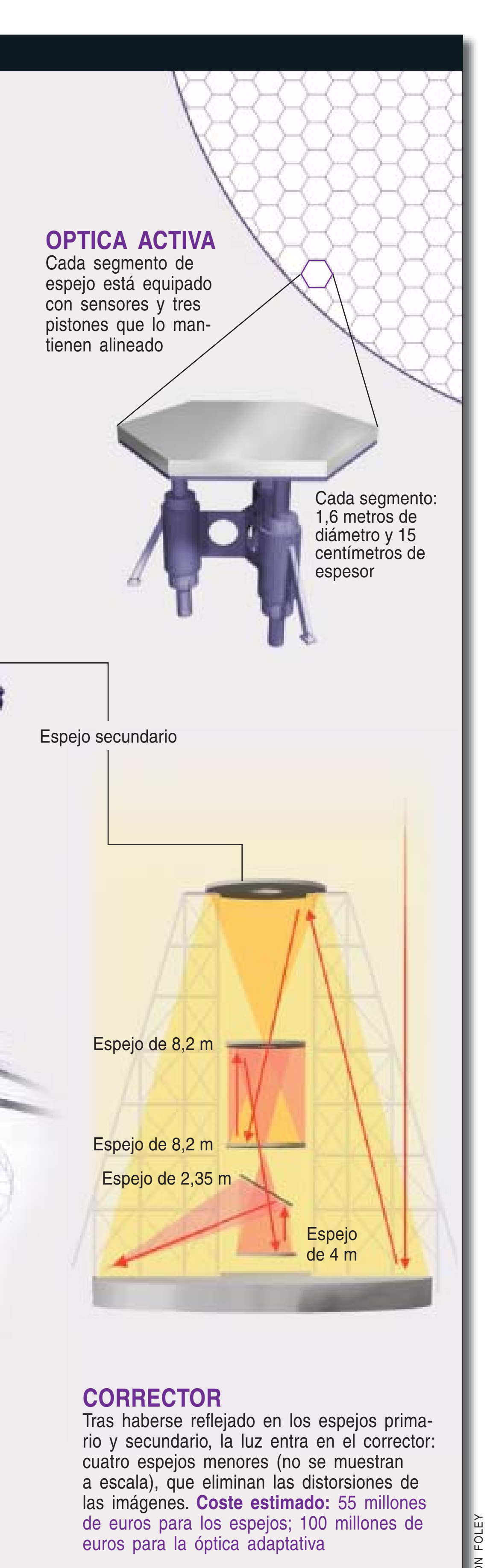
ESPEJO PRIMARIO
El espejo primario (el que recoge la luz de las estrellas) está formado por 3048 segmentos hexagonales. Para ahorrar dinero, formarán una superficie esférica y no el clásico paraboloide o hiperboloide.
Coste: 290 millones de euros

ESPEJO SECUNDARIO
El espejo secundario (el que redirige la luz estelar hacia un corrector) está formado por 216 segmentos. Para facilitar los requerimientos mecánicos, el espejo es plano, no curvo.
Coste estimado: 30 millones de euros

HANGAR
Una versión de 100 metros de la típica cúpula rotatoria sería demasiado costosa. El telescopio funciona al aire libre y una sencilla cubierta deslizable rodará para proteger al telescopio durante el mal tiempo.
Coste estimado: 70 a 150 millones de euros

ESTRUCTURA
El entramado triangular de la armadura del telescopio se distorsiona de manera simétrica cuando se inclina hacia el horizonte, manteniéndose así alineados los espejos. El desplazamiento horizontal varía entre 0 (*azul*) y 0,6 milímetros (*rojo*). Aunque parece que la estructura oculta el espejo, sólo bloquea un 3 por ciento de la luz entrante.
Coste estimado: 185 millones de euros

TRACCION MECANICA
El telescopio pesa casi 15.000 toneladas, cifra excesiva para las monturas típicas. En su lugar, se puede instalarlo sobre 300 *bogies* (grupos de cuatro ruedas en dos ejes), con los que se deslizaría sobre raíles dispuestos circularmente.
Coste estimado: 30 millones de euros



los diferentes colores y realizar con ellos un análisis químico. El diámetro del Telescopio Espacial Hubble estaba limitado a 2,4 metros debido al tamaño de la lanzadera espacial; incluso el James Webb contará con un espejo de sólo 6,5 metros. El seguimiento espectroscópico de los descubrimientos realizados por los telescopios espaciales se hace desde la superficie terrestre.

La nueva generación de telescopios no debe sacrificar la sensibilidad por la resolución, ni viceversa, porque sus objetivos científicos requieren de la una y la otra. Le bastaría una exposición de una sola noche a un telescopio de 100 metros para detectar cuerpos celestes con una milésima del brillo del objeto más tenue que hasta ahora se haya visto. Allí donde los telescopios actuales observan una mancha negra en el espacio, el de 100 metros captaría una multitud de objetos débiles. Pero sin una resolución espacial adecuada, aparecerían mezclados unos con otros.

La combinación entre una alta resolución y una buena sensibilidad es capital para la detección de planetas terrestres. Para detectar un planeta como la Tierra, unos mil millones de veces menos brillante que su estrella anfitriona, hay que suprimir la luz de ésta con un disco opaco, el coronógrafo. Si el disco es demasiado grande, ocultará también el planeta. La alta resolución permite a los astrónomos operar con un disco pequeño, extendiendo así el alcance de la búsqueda de planetas. El diámetro mínimo de un telescopio capaz de rastrear nuestros alrededores galácticos en busca de planetas en órbitas semejantes a la terrestre ronda los 80 metros. Un aparato así podría examinar un volumen de espacio con unas 400 estrellas de tipo solar y tomar el espectro de unos 40 planetas como la Tierra, si existen en esa región. Un instrumento de 30 metros sólo rastrearía algunas docenas de sistemas. Para obtener el espectro de uno solo de ellos tendría que recoger fotones durante semanas; quizá no sería posible.

Avanzado y adaptado

Con el fin de conseguir tan alta resolución, el telescopio se valdrá de la "óptica adaptativa", que deshace las distorsiones de la turbulencia atmosférica: la forma del espejo se ajusta de suerte tal, que una estrella de referencia (o una "estrella artificial" creada por un láser disparado hacia las capas altas de la atmósfera) se mantenga siempre enfocada. Ese espejo puede ser el secundario, u otro, más pequeño, entre el secundario y los detectores. Una maraña de pistones, o "actuadores", presionan por detrás del espejo para ese ajuste fino de su perfil.

El telescopio funciona así con —o cerca de— la máxima capacidad resolutiva, limitada sólo por la difracción. Como si la atmósfera no existiera. Un telescopio de 100 metros de diámetro podría resolver rasgos de apenas 0,001 segundo de arco, es decir, 40 veces mejor que el Hubble. Con semejante resolución, Betelgeuse no aparecería constituida en una simple mancha de luz, sino como una imagen de 3000 píxeles de una nitidez sólo comparable con la de las imágenes que hoy se toman de los planetas más cercanos.

La óptica adaptativa se emplea en muchos telescopios grandes. No está claro que resulte posible aplicarla en sistemas mayores: para un telescopio de 100 metros, un sistema de óptica necesitaría más de 100.000 actuadores, por 1000, como mucho, en los instrumentos de hoy. Los ordenadores tendrían que actualizar la silueta del espejo varias veces por segundo; los procesadores actuales no trabajan con tanta rapidez.

Los ingenieros abordan la tarea paso a paso. Para empezar, construyen sistemas que operen en el infrarrojo cercano, donde se necesitan menos actuadores, ya que el efecto de la turbulencia es menor a mayores longitudes de onda. Deberían también sacar partido del desarrollo de ópticas adaptativas avanzadas que se estudian para su uso en medicina, vuelos espaciales, vigilancia militar y electrónica. Una nueva técnica muy prometedora se nos ofrece con la óptica adaptativa multiconjugada, que corrige la turbulencia en un campo ancho de visión; con ella, los sistemas no habrían de limitarse a la pequeña región del cielo alrededor de la estrella de referencia. El VLT realizará en breve una prueba de óptica multiconjugada.

La interferometría, o combinación de la luz recogida por más de un

telescopio, puede proporcionar una resolución espacial incluso mayor que la de los telescopios gigantes. En el Observatorio de Paranal opera uno de estos sistemas. Los cuatro telescopios VLT están separados 130 metros, por lo que al combinar la luz que recolectan se alcanza la misma resolución espacial que con un telescopio de 130 metros de diámetro; los objetos celestes se observan así con muchísimo detalle. Pero los interferómetros tienen sus propias limitaciones. Sólo escrutan un campo muy pequeño de visión y emplean un pequeño porcentaje de la luz recogida. Tal rendimiento contrasta con el 50 por ciento o más de eficiencia de un telescopio ordinario y, en cualquier caso, su área colectora no es más que la suma de los telescopios que lo componen. En resumen, al igual que los telescopios espaciales, los interferómetros ganan en resolución y pierden en sensibilidad; no pueden sustituir, pues, a un instrumento gigante instalado en tierra.

Tuercas y tornillos

Toda la técnica óptica avanzada del mundo no significa nada si el telescopio no puede soportar su propio peso. Aunque se han construido antenas de 100 metros de diámetro, los requerimientos mecánicos de los telescopios ópticos son mucho más exigentes, ya que trabajan con longitudes de onda bastante más cortas.

El armazón del telescopio ha de contar con rigidez suficiente para mantener los espejos alineados con precisión y resistir las vibraciones causadas por el viento. Los telescopios cortos y gruesos tienden a ser más rígidos que los altos y delgados, pero han de doblar la luz más veces para conducirla al foco; eso complica el diseño óptico. Hay que encontrar un equilibrio entre los requerimientos ópticos y los mecánicos. El aire zarandea el VLT, pero el espejo secundario cancela el efecto de las vibraciones al moverse en dirección opuesta unas 70 veces por segundo. El telescopio OWL haría lo mismo.

Además, conforme el telescopio sigue una estrella en el cielo su peso se desplaza; si el instrumento se dobla entonces, los espejos se desalinearán. La mayoría de los telescopios utilizan la estructura que el ingeniero Mark Serrurier diseñó para Monte Palomar en los años treinta: los espejos permanecen sujetos a unas armaduras abiertas, a modo de caja, compuestas por cuatro entramados triangulares. Cuando el instrumento se inclina, las armaduras se flexionan, desplazando los espejos lateralmente; puesto que los dos espejos están sujetos por armaduras del mismo tipo, se desplazarán igual y mantendrán su alineación. OWL presenta un diseño parecido, con la ventaja añadida de que puede construirse con componentes prefabricados, como un mecano.

El peso total de la estructura será de 10.000 a 15.000 toneladas, dependiendo del material del espejo. Pese a su colosalismo, el OWL sería, en proporción, más ligero que los telescopios actuales. Una sola de las unidades VLT, llevada a ese tamaño, pesaría en torno al medio millón de toneladas. No obstante, mover 10.000 toneladas con la precisión necesaria supone un reto formidable. Entre las soluciones que se están estudiando se encuentran los desplazamientos sobre *bogies* (grupos de cuatro ruedas en dos ejes, una tracción por fricción), que el telescopio flote sobre finas capas de aceite (como las unidades del VLT) y la levitación magnética.

Contra la ley

Desde el punto de vista técnico, por tanto, no es una locura pensar en la construcción de un telescopio de 100 metros de diámetro. En el pasado, el aumento de tamaño de los telescopios exigía un salto tecnológico; en cambio, la nueva generación de telescopios gigantes puede surgir del conocimiento y experiencia actuales. A los constructores de hoy, una estructura de 100 metros les resulta casi normal.

El verdadero problema, llegados a este punto, es el coste. Históricamente, el precio de los telescopios ha venido siendo proporcional al diámetro del espejo primario elevado a la potencia 2,6 ($D^{2,6}$). Si los cuatro telescopios VLT de ocho metros costaron 100 millones de dólares cada uno, en un telescopio de 20 metros se invertirían alrededor de los mil millones de dólares. El coste de un telescopio de 100 metros ascendería a setenta mil millones de dólares. A la luz de esta ley de costes de los telescopios, parece que los astrónomos deberían proponerse la construcción de múltiples copias de telescopios pequeños, hasta alcanzar el tamaño deseado. Los gastos subirían entonces con el diámetro del espejo al cuadrado (D^2): por mil millones de dólares podríamos comprar diez telescopios de 8,2 metros, con un área equivalente a un telescopio de 26 metros. Sin embargo, por las razones descritas anteriormente, la igualdad de tamaños no se traduce en una igualdad de capacidades. Utilizados sus componentes como telescopios comunes, el conjunto tendría la sensibilidad de un telescopio de 26 metros, pero el poder resolutivo de uno de 8,2 metros. Y si se utilizara como interferómetro, la resolución sería mayor pero se perdería sensibilidad.

Por fortuna, los ingenieros creen que pueden burlar la ley. La clave está en la producción en cadena de los componentes, con una reducción extraordinaria del coste. Para ello se requieren, sin embargo, innovaciones ópticas. En lugar de un espejo primario hiperboloide, que obliga a que cada segmento especular sea único en función de su posición dentro del espejo, el telescopio de 100 metros podría adquirir una configuración esférica; cada segmento tendría entonces la misma forma. Una cadena de producción fabricaría los 3048 segmentos a razón de uno cada dos días. La configuración esférica introduce una distorsión de la luz. Para compensarla, el telescopio debería llevar un dispositivo corrector parecido al que arregló la vista del Hubble.

La cúpula supone uno de los mayores desembolsos en la construcción

OTROS PROYECTOS TELESCOPICOS

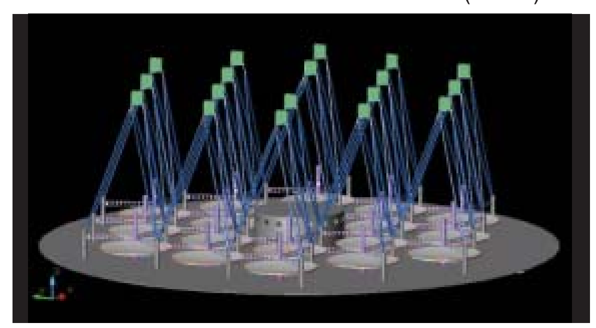
EL TELESCOPIO DE 30 METROS (TMT)



Diámetro: 30 metros
Coste estimado: 700 millones de dólares
Diseño: Primario segmentado hiperboloide
Página web: www.tmt.org

TODD MASON *Mason Productions* (*TMT*); PAUL HICKSON *Universidad de la Columbia Británica* (*LAMA*); TODD MASON *Mason Productions* Y OBSERVATORIOS CARNEGIE (*GMT*); PROYECTO EURO50 *Observatorio Lund, Suecia* (*Euro50*)

RED DE ESPEJOS DE GRAN ABERTURA (LAMA)



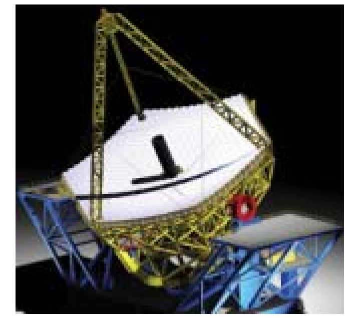
42 m (área colectora equivalente), 54 m (resolución equivalente)
50 millones de dólares
18 espejos paraboloides de mercurio líquido y 10 m de diámetro, todos apuntando hacia la vertical
www.astro.ubc.ca/LMT/lama

TELESCOPIO GIGANTE DE MAGALLANES (GMT)



21,4 m (área), 24,5 m (resolución)
500 millones de dólares
Siete espejos hiperboloides de 8,4 m en una sola montura
www.gmto.org

EURO50



50 m
700 millones de dólares
Primario segmentado elipsoidal
www.astro.lu.se/-torben/euro50

de un telescopio. La cúpula del telescopio de Monte Palomar y la de la basílica de San Pedro alcanzan un tamaño parecido. La razón de semejante magnitud estriba en que la montura del telescopio se halla algo inclinada, para apuntar a la estrella Polar. De esta manera, el telescopio puede seguir las estrellas con un sencillo giro. Los telescopios modernos tienen monturas más pequeñas, llamadas alta-azimutales (el término se refiere al movimiento en dos dimensiones, la altitud sobre el horizonte y el ángulo azimutal, en vez de la simple rotación alrededor de un eje fijo). Ese tipo de montura demanda un mecanismo complicado de control. Las computadoras han resuelto este punto. Incluso con este sistema alta-azimutal, el telescopio de 100 metros necesitaría una cúpula costosísima. Además, las simulaciones por ordenador indican que la gigantesca estructura crearía turbulencias en el aire. Por todo ello, OWL dispondría sólo de un hangar deslizable, para cubrirlo durante el día y protegerlo del mal tiempo. El telescopio funcionaría al aire libre. Podría soportar un viento de hasta 15 metros por segundo (unos 54 km/h).

El panorama astronómico

Si hemos disfrutado de un decenio dorado para la astronomía, cabe esperar aún mejores perspectivas para el año 2015. Las innovaciones en los detectores y la óptica adaptativa incrementarán la capacidad de la presente generación de telescopios de 8 y 10 metros tal y como las nuevas cámaras y espectrógrafos le han dado más vida al Hubble. La interferometría, que no será ya una rareza, sino una técnica común, analizará objetos cada vez más débiles y alcanzará resoluciones de menos del milisegundo de arco. Para entonces ya se habrá lanzado el telescopio espacial James Webb, dedicado a las observaciones infrarrojas. ALMA ("la Gran Red Milimétrica de Atacama") habrá empezado a funcionar, con docenas de antenas; será el puente entre la radioastronomía y la astronomía infrarroja. Quizá se esté construyendo en esos días la Red del Kilómetro Cuadrado, que detectaría ondas radio de baja frecuencia, una región poco explorada del espectro electromagnético.

Con todos estos avances, ¿se necesitarán de verdad nuevos telescopios gigantes ópticos? La respuesta es un resonante sí. Algunas cuestiones fundamentales, así el estudio de los planetas extrasolares y de la formación de estrellas y galaxias, no pueden abordarse con instrumentos pequeños. En cuanto a la luz visible y el infrarrojo cercano, los telescopios de superficie ofrecen una mayor resolución y sensibilidad a menor coste que los observatorios espaciales.

No va a ser fácil decidir entre OWL, TMT y GMT. Cada uno de ellos tiene sus pros y sus contras. Un panel internacional ha evaluado recientemente los fundamentos de OWL, y ha concluido que, si bien es factible, resulta arriesgado. Puede que los distintos proyectos terminen convergiendo; el TMT es ya una fusión de varios diseños anteriores.

Con los siglos, el tamaño de los telescopios ha ido creciendo. Los primeros no eran mayores que una mesilla. Fueron luego como una habitación, como una casa y como una catedral. Ahora quieren ser como un rascacielos. Gracias a los avances técnicos, sabemos fabricar instrumentos que verían las primeras estrellas nacidas del universo y planetas parecidos a la Tierra alrededor de otras estrellas. La cuestión no es ya si podríamos y deberíamos construir telescopios gigantes, sino cuándo lo haremos y de qué tamaño serán.

El autor

Roberto Gilmozzi es el investigador principal del proyecto del telescopio OWL. Entre 1999 y 2005 dirigió el Observatorio del Gran Telescopio (VLT) en Cerro Paranal (Chile), del Observatorio Europeo del Sur.

Bibliografía complementaria

OWL CONCEPT STUDY. R. Gilmozzi y P. Dierickx en *ESO Messenger*, n.º 100, págs. 1-10; junio 2000.

PROCEEDINGS OF SECOND BÄCKASKOG WORKSHOP ON EXTREMELY LARGE TELESCOPES. Dirigido por A. L. Ardeberg y T. E. Andersern en *Proceedings of the SPIE*, vol. 5382; julio 2004.

THE LIGHT BRIGADE. Neil deGrasse Tyson en *Natural History*, vol. 115, n.º 2, págs. 18-29; marzo 2006.

EXPLORING THE COSMIC FRONTIER: ASTROPHYSICAL INSTRUMENTS FOR THE 21ST CENTURY. ESO Astrophysics Symposia. Springer-Verlag (*en prensa*).



Historia de la regla de cálculo

Antes de la llegada de las calculadoras electrónicas, científicos e ingenieros se servían de la regla de cálculo

Cliff Stoll



BRAD DECECCO

Hace dos generaciones, había una uniformidad, una norma que identificaba a los ingenieros: camisa blanca, corbata estrecha, protector de bolsillo y... regla de cálculo. La camisa y la corbata se trocaron, por evolución, en camisetas de manga corta, con propaganda de algún producto informático. El refuerzo del bolsillo ha sido reemplazado por una funda de teléfono móvil. La regla de cálculo, por una calculadora electrónica.

Echemos otra mirada a esa regla de cálculo. Sáquela de ese cajón donde la dejó arrinconada hace 30 años o constrúyase una usted mismo. Enseguida verá por qué fue antaño tan valiosa.

Hasta los años setenta, la regla de cálculo era tan corriente como las máquinas de escribir o las mimeográficas o "ciclostilos". Ingenieros y científicos multiplicaban, dividían, hallaban raíces cuadradas y cúbicas en unos cuantos segundos de trastear con ella. Con un pequeño esfuerzo adicional, calculaban también cocientes, inversos, senos, cosenos y tangentes.

La regla de cálculo, grabadas en ella una docena o más de escalas funcionales, simbolizaba los misterios de una ciencia arcana. En realidad, casi toda la tarea se realizaba con sólo dos escalas, pues un gran número de trabajos técnicos se reducían, a fin de cuentas, a multiplicaciones y divisiones. Los pianistas suelen tocar casi todas las teclas del piano, pero rara vez el ingeniero usaba todas las escalas de su regla.

Los más ostentosos blandían reglas de cálculo hechas con exótica caoba o madera de boj; otros exhibían reglas construidas con marfil, aluminio o fibra de vidrio. Las de los pobres mortales —entre ellos el autor— eran de plástico. Pero todas las reglas de cálculo, desde la más humilde hasta las más encopetadas, se basaban en logaritmos.

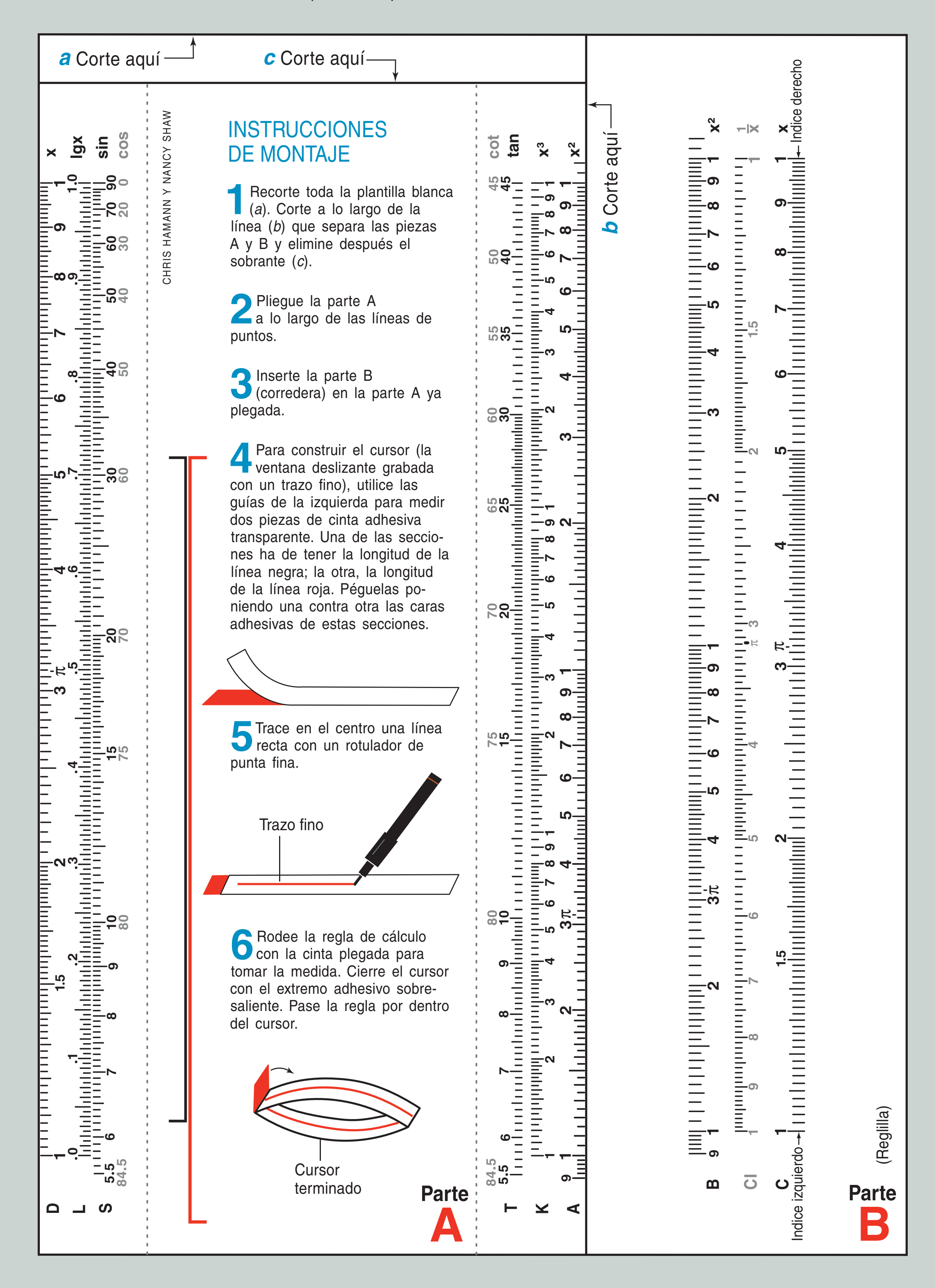
El nacimiento de la regla de cálculo

John Napier, matemático, físico y astrónomo escocés, inventó los logaritmos en 1614. Su *Canon de Logaritmos* comienza así: "Viendo que nada hay que sea tan penoso en la práctica de las matemáticas, ni que tanto moleste y entorpezca a los calculadores, como las multiplicaciones, las divisiones, las extracciones cuadradas o cúbicas de números grandes, que además del tedioso dispendio de tiempo están en su mayor parte sujetas a muchos e insidiosos errores, comencé pues a considerar en mi mente mediante qué seguro y presto arte podría eliminar tales obstáculos".

En efecto, los logaritmos —ese horror de las matemáticas de bachillerato— se crearon para facilitarnos la vida. Dentro de pocas generaciones,

COMO CONSTRUIR UNA REGLA DE CALCULO

Se puede construir una regla de cálculo con papel y cinta adhesiva transparente. Para disponer de un instrumento razonablemente robusto, conviene fotocopiar estos planos en cartulina.



ASI SE USA UNA REGLA DE CALCULO

Ante todo, tome una en sus manos. La escala fija superior suele ser la escala A. Las escalas B y C se encuentran en la reglilla central, o corredera. La escala D es la escala fija situada bajo la reglilla. El índice, o número guía, izquierdo se encuentra en la corredera (corresponde al 1 situado en el extremo izquierdo de la escala C). En el extremo derecho de la escala C encontramos otro 1 (un 10 en las reglas Faber-Castell): es el índice derecho. El cursor móvil lleva grabada una línea muy fina.

Para multiplicar dos números, se desplaza la reglilla hasta que el número guía izquierdo coincida en la escala D con el primero de los dos factores. Ahora se desliza el cursor hasta que su trazo señale en la escala C el segundo factor. El producto aparecerá bajo el trazo en la escala D. Así, para multiplicar 2 por 4, se ajusta la escala C hasta que el índice izquierdo coincida con el 2 en D. Se mueve el cursor hasta que su trazo quede sobre el 4 de C. Encontraremos el producto, 8, en la escala D, justo debajo del trazo.

Si el resultado del cálculo cae fuera de la parte fija de la regla, se utiliza el índice derecho. Así, para multiplicar 7 por 6, se coloca el índice derecho de C sobre el 7 de la escala D y se traslada el cursor hasta el 6 de la escala C. En la escala D leemos ahora 4,2; recordemos entonces que la escurridiza coma decimal ha de desplazarse una posición hacia la derecha para obtener el resultado correcto, que es 42.

Para dividir, se toma el dividendo en la escala D y se pone sobre este número el trazo del cursor. Se desplaza entonces la corredera hasta que el divisor quede también bajo el trazo (su graduación en la escala C coincidirá con la del dividendo en la D). El cociente se lee debajo del índice. Dividamos, por ejemplo, 47 entre 33. Se desplaza el cursor hasta que el trazo señala 4,7 en la escala D. Se desplaza la corredera hasta que el 3,3 de la escala C quede bajo el trazo. Ahora el índice izquierdo está señalando en D el cociente, que es 1,42.

¿Queremos hallar el cuadrado de un número? No será necesario mover la corredera. Basta colocar el trazo sobre un número de D. Se consulta entonces la escala A, donde se lee el cuadrado. Así, justamente encima del 7, en la escala A, leemos 4,9. Se corre la coma decimal a la derecha para obtener el valor correcto: 49.

Para obtener raíces cuadradas tampoco es necesario mover la reglilla. Fijémonos que la escala A está dividida en dos partes: la primera mitad va de 1 a 10; la segunda, de 10 a 100. Para hallar la raíz cuadrada de un número cualquiera comprendido entre 1 y 10 se sitúa el trazo sobre ese número en la mitad izquierda de la escala A y la raíz se lee en la escala D. Para los números de 10 a 100 se usa la mitad derecha de la escala A. Cuando los números están expresados en notación científica, los que tengan exponentes pares (por ejemplo $1{,}23 \times 10^4$) se buscan en la mitad izquierda de la escala A; los de exponente impar (como $1{,}23 \times 10^3$) se buscan en la mitad derecha.

Se descubren fácilmente varios atajos. Por ejemplo: usar el cursor como memoria a corto plazo para encadenar cálculos o la escala CI para impedir que los cálculos desborden los extremos de la regla.

Verá que su regla de cálculo casera cuenta con otras escalas. La escala K sirve para cubos y raíces cúbicas; las escalas S y T proporcionan senos y tangentes. La escala L da el logaritmo de los números de la escala D.

Pruebe todo esto en la regla que se ha construido. Con un poco de práctica, comprobará asombrado la facilidad de uso y su utilidad.

muchos se enterarán, boquiabiertos, de que también los ordenadores se inventaron con idéntico fin.

¿Cómo funcionaban los logaritmos de Napier? Escuchemos al propio inventor: “Expulsad del trabajo propiamente dicho hasta los números mismos que se han de multiplicar, dividir o resolver en raíces, y poned en su lugar otros números que lleven a cabo tanto como aquéllos pudieran hacer, pero sólo mediante la adición, la sustracción, la división por 2 o la división por 3”.

Ello significa que, mediante logaritmos, las multiplicaciones se simplifican en sumas, la división se convierte en sustracción, el cálculo de una raíz cuadrada resulta ser una división por 2 y la extracción de una raíz cúbica una división por 3. Por ejemplo, para multiplicar 3,8 por 6,61 se consultan en una tabla los logaritmos de estos números. En ella encontramos 0,58 y 0,82, que se suman y se obtiene 1,4. Ahora se vuelve a consultar la tabla y se busca el número cuyo logaritmo es 1,4. Se obtiene así una aproximación del producto: 25,12. ¡Idos sean los insidiosos errores!

El invento de Napier provocó una revolución. Los matemáticos lo adoptaron de inmediato para acelerar sus cálculos. El astrónomo alemán Johannes Kepler se valió de estos modernos logaritmos para calcular la órbita de Marte. Sin la ayuda de los logaritmos quizá nunca hubiera llegado a descubrir su tercera ley de la mecánica celeste. Henry Briggs, el más eminente matemático inglés de aquellos tiempos, viajó a Escocia con el único propósito de conocer a Napier. Briggs se presentó a sí mismo diciendo: “Milord, he emprendido deliberadamente este largo viaje para ver su persona y para conocer mediante qué aparato de talento o ingenio se le ocurrió a vuesa merced pensar en esta ayuda tan sumamente excelente para la astronomía… Me pregunto por qué nadie más la descubrió antes, cuando, ahora que se conoce, parece tan fácil”. Briggs supo apreciar la genialidad. Napier prosiguió: inventó el punto decimal (nuestra coma) y las vari-

1. LA REGLA DE CALCULO fue inventada en 1622 por William Oughtred, un clérigo inglés. Robert Bissaker construyó en 1654 la primera regla de cálculo cuya reglilla encajaba en una estría labrada en una base fija (*abajo*). La de Henry Sutton (*ca.* 1663, *arriba*) fue una de las primeras reglas de cálculo circulares.

llas de cálculo (o “huesos de Napier”), y desbrozó el terreno para el cálculo de Isaac Newton.

Napier había simplificado las tareas de cómputo. Pero la aplicación de su procedimiento requería un acceso rápido y sencillo a los libros de tablas de logaritmos. En 1620, el matemático londinense Edmund Gunter graduó una regla con logaritmos. Ello permitió a sus colegas calculistas hallar logaritmos sin tener que ir hasta la biblioteca. Lo que hizo Gunter fue graduar una línea recta, de forma que la posición de los números fuera proporcional a su logaritmo. En esta escala, los números sucesivos aparecen bastante espaciados en el extremo izquierdo de la regla y, en cambio, se apiñan en el extremo derecho. Para multiplicar dos números bastaba entonces con medir la distancia desde el origen de la escala hasta uno de los factores con un compás de puntas, y trasladar después esta distancia a partir de la posición correspondiente al otro. El producto se leía en el número situado en la suma de esas distancias.

Hacia 1622, William Oughtred, un ministro anglicano, colocó dos escalas logarítmicas de madera muy juntas. Creó así la primera regla de cálculo. Pocos años después construyó una versión circular de la misma. Pero Oughtred, amante de la matemática pura, no parece que concediera demasiada importancia a su invento. Después de todo, los matemáticos creaban fórmulas y ecuaciones; no las aplicaban.

Por las razones que fuera, Oughtred no llegó a hacer público su invento. Pero uno de sus alumnos, Robert Delamain, proclamó en un panfleto de 1630 que había creado la regla de cálculo circular. Delamain, más ingeniero que matemático, estaba encantado por su portabilidad: “apta para ser usada tanto a caballo como a pie”.

Al verse negado del crédito que su invento merecía, Oughtred montó en cólera. Hizo bandera con sus amigos, quienes acusaron a Delamain de “desfachatez” y de ser “un descuidero del ingenio ajeno”. La disputa no cesó hasta la muerte de Delamain, sin que en nada beneficiase a ninguno de los dos. Más adelante, Oughtred escribiría, “Este escándalo me ha valido muchos perjuicios y desventajas”.

Adiós a los logaritmos

Con el invento de Oughtred en las manos, nadie necesitaba tablas de logaritmos, ni precisaba siquiera saber qué era un logaritmo. Para multiplicar bastaba con colocar dos números, uno a continuación del otro, y leer en una escala. Era rápido y eminentemente portátil. La regla de cálculo “expulsaría el resultado” de forma automática.

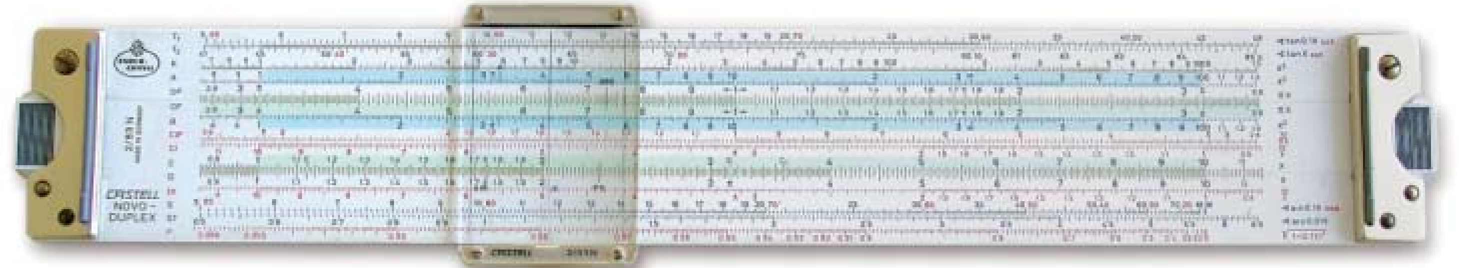
2. OTIS KING, ingeniero londinense, logró en 1921 arrollar varios metros de escalas en torno a un cilindro que cabía en el bolsillo. Logró así una regla de cálculo portátil de una resolución impresionante.

La idea era maravillosa. Aun así, las reglas de cálculo tardaron un par de siglos en tomar arraigo. En fecha tan tardía como 1850, el matemático británico Augustus de Morgan se lamentaba de esta resistencia: “Por unos cuantos chelines, casi todo el mundo podría llevar en el bolsillo una potencia de cálculo varios centenares de veces mayor que la que hay en su cabeza”.

La regla de cálculo se perfeccionó y su uso se generalizó durante la primera mitad del siglo XIX. En una conferencia pronunciada ante la Regia Sociedad en 1814, Peter Roget (el compilador del *Thesaurus*) explicó su invento, la regla de cálculo doblemente logarítmica. Con este instrumento se podían calcular fácilmente potencias y raíces de exponente fraccionario: por ejemplo, 30,6 elevado a 2,7. Con todo, la utilidad de la regla doblemente logarítmica no se apreció hasta 1900, cuando químicos, ingenieros eléctricos y físicos empezaron a vérselas con matemáticas de complejidad creciente.

Hizo falta un teniente de artillería francés —Amédée Mannheim— de 19 años de edad para popularizar la regla de cálculo. En 1850, seleccionó las cuatro escalas de mayor utilidad y añadió un cursor móvil (un indicador deslizante para alinear los números de las escalas). En el plazo de unos pocos años, el ejército francés adoptó su instrumento. Cuando la infantería prusiana te está atacando, ¿quién tiene tiempo para apuntar un cañón efectuando divisiones con lápiz y papel?

En poco tiempo, los ingenieros, los topógrafos, los químicos y los astrónomos europeos estaban usando la regla refinada de Mannheim. Los científicos estadounidenses empezaron a adoptarla después de la Primera Guerra Mundial. Todas las reglas, excepto las más económicas, contaban con escalas de cuadrados y de raíces; la mayoría facilitaba también el cálculo de cubos, raíces cúbicas, inversos, senos y tangentes. Las más perfectas incluían funciones hiperbólicas para facilitar el cálculo de



3. LA REGLA DE CALCULO FABER-CASTELL 2/83N se cuenta entre las más hermosas y excelentes que se han construido.

WWW.VINTAGECALCULATORS.COM (*arriba*); FABER-CASTELL AG (*abajo*)

vectores a los ingenieros eléctricos o el de curvas catenarias (elementos de suma importancia para los puentes colgantes) a los ingenieros de estructuras. Para lograr mayor precisión, los fabricantes dotaron a los cursores de lentes ampliadoras (que facilitaban la lectura de la posición de las escalas), grabaron con marcas cada vez más finas las divisiones y construyeron reglas de mayor longitud. Consignaron los logaritmos de Napier sobre círculos, espirales, discos y cilindros.

En 1921, el ingeniero londinense Otis King dispuso en espiral una escala logarítmica de un metro y medio de largo sobre un cilindro de 25 milímetros de diámetro, que cabía en el bolsillo. Los ingenieros quedaron maravillados por su precisión de cuatro dígitos. Para mayor exactitud, uno debía invertir sus ahorros en la regla de Fuller, la abuelita de las reglas de cálculo de precisión elevada. Una hélice logarítmica de unos 12,5 metros serpeaba por el exterior de un cilindro de 30 centímetros de largo. Valiéndose de un indicador especial, proporcionaba la exactitud de una escala de 25,3 metros, lo que permitía efectuar cálculos con una precisión de 5 cifras. Este complicado artilugio podría confundirse con un colosal rodillo de cocina con grabados.

Los técnicos se adaptaron a las reglas de cálculo. (No cabía otra opción.) A su vez, los fabricantes de reglas inscribieron en ellas marcas adicionales para acelerar los cálculos. En las escalas solían encontrarse los valores de π, de $\pi/4$, de la constante *e* (la base de los logaritmos "naturales") y, en ocasiones, marcas en los cursores para la conversión de pulgadas en centímetros o de caballos de vapor en watt. Aparecieron reglas especializadas grabadas con masas moleculares para uso de los químicos, relaciones hidráulicas para la construcción naval o constantes de desintegración radiactiva para proyectistas de bombas atómicas.

La regla de cálculo doblemente logarítmica y de doble cara era ubicua entre los ingenieros en 1945. Estaba provista de casi una docena de escalas por cada lado; permitía elevar un número a una potencia cualquiera, así como manejar con facilidad senos, cosenos y la trigonometría hiperbólica. En la Segunda Guerra Mundial, los bombarderos y los navegantes de las fuerzas aéreas que necesitaban efectuar con prontitud cálculos complicados solían utilizar reglas de cálculo especializadas. La Marina estadounidense diseñó un "chasis universal" para reglas de cálculo, con cuerpo de aluminio y cursor de plástico, en el que se insertaban tarjetas de celuloide para efectuar cálculos especializados para hallar el radio de acción, consumo de combustible y altitud de los aviones.

Hace 40 años no era posible graduarse en una escuela de ingeniería sin pasar por una semana de instrucción dedicada a la práctica con la regla de cálculo. En todos los departamentos de ingeniería eléctrica se podían ver reglas de cálculo colgadas de los cinturones en fundas de cuero; los más modernos lucían prendedores de corbata con función de regla de cálculo. En los seminarios y cursillos era fácil ver quienes se dedicaban a comprobar los datos que daba el ponente. Las empresas de "técnica de punta" regalaban reglas de cálculo grabadas con el nombre de la firma a sus clientes y posibles futuros empleados.

LOGARITMOS

¿No tiene claros los logaritmos? He aquí un breve resumen. Si $a^x = m$, entonces *x*, el exponente, recibe el nombre de logaritmo de *m* en base *a*. Aunque *a* puede ser cualquier número positivo, nos centraremos en los logaritmos ordinarios (o decimales), es decir, los logaritmos de los números cuando $a = 10$. El logaritmo decimal de 1000 es 3, porque al elevar 10 a la tercera potencia, $10^3 = 1000$. Recíprocamente, el antilogaritmo de 3 es 1000: es el resultado de elevar 10 a la potencia 3.

Los exponentes no tienen que ser enteros; pueden ser fracciones o números decimales. Por ejemplo, $10^{0,25}$ es aproximadamente 1,778 y $10^{3,7}$ ronda en torno a 5012. Así pues, el logaritmo de 1,778 es 0,25 y el logaritmo de 5012 es 3,7.

Cuando todas las cantidades están expresadas en forma de potencias de 10, para multiplicar números basta sumar los exponentes. Así, $10^{0,25}$ multiplicado por $10^{3,7}$ es $10^{3,95}$ ($10^{0,25 + 3,7}$). ¿Cuánto vale $10^{3,95}$? Para ello se consulta el antilogaritmo de 3,95 en una tabla de logaritmos: encontraremos 8192, que es efectivamente igual al producto de 1,778 por 5012. (Los logaritmos vulgares se pueden consultar, por ejemplo, en Google escribiendo "log(x)", o consultando un manual en una biblioteca.)

Al igual que la multiplicación se simplifica a una suma, la división se convierte en una resta. Veamos cómo se divide 729 entre 12,3 usando logaritmos. Se buscan los logaritmos de 729 y de 12,3, que son, respectivamente, 2,88 y 1,09. Se resta 1,09 de 2,88 y se obtiene 1,79. Ahora se busca el antilogaritmo de 1,79 y se obtiene el resultado: 23,82.

Como siempre, hay complicaciones. Las tablas de logaritmos dan solamente la mantisa, es decir, la parte decimal del logaritmo. Para obtener el verdadero logaritmo es necesario sumarle a la mantisa un número entero (llamado característica). La característica es el número de posiciones que debe desplazarse la coma decimal del número asociado. Así, para hallar el logaritmo de 8912 se consultaría en una tabla el logaritmo de 8,192, que es 0,95. Se determina entonces la característica de 8912, que es 3 (porque para obtener 8,912 a partir de 8912 es necesario desplazar la coma decimal tres puestos hacia la izquierda). Al sumar la característica a la mantisa se obtiene el logaritmo vulgar de 8912: 3,95.

Dado que los logaritmos vulgares son números irracionales (que habrían de expresarse mediante infinitas cifras decimales no periódicas) y las tablas de logaritmos tienen una precisión limitada, los cálculos que utilizan logaritmos dan sólo buenas aproximaciones, no resultados exactos.

Los logaritmos aparecen en todas las ciencias. La acidez, en química, se expresa mediante el *p*H, que es el logaritmo de la concentración de iones hidrógeno, cambiado de signo. La intensidad sonora, expresada en decibelios (dB), es 10 veces el logaritmo del cociente de la intensidad sonora dividida entre una intensidad de referencia. La intensidad de los terremotos se mide en la escala de Richter, que está basada en logaritmos, lo mismo que las magnitudes de brillo de las estrellas y los planetas.

Los logaritmos aparecen por doquier también en la vida diaria. Muchos gráficos que representan números grandes se valen de escalas logarítmicas que representan los números por órdenes de magnitud (10, 100, 1000, y así sucesivamente): las mismas escalas que aparecen en las reglas de cálculo.



4. HACE 50 AÑOS "computador" significaba "calculista", una persona que se dedicaba profesionalmente al cálculo de valores numéricos. Este anuncio de 1953 presagiaba los cambios que se iban a producir cuando las calculadoras electrónicas y los ordenadores digitales comenzaron a ser de uso corriente.

El cenit de la regla de cálculo

Pensemos en las proezas ingenieriles que deben su existencia al roce de dos varillas adosadas: el edificio Empire State, la presa Hoover, las curvas del puente Golden Gate, las transmisiones hidráulicas automáticas de los automóviles, las radios de transistores, el Boeing 707 y un largo etcétera. Werner von Braun, que diseñó los cohetes V-2 alemanes y el Saturno 5 estadounidense, se servía de una regla de cálculo bastante corriente manufacturada por la empresa alemana Nestler. De hecho, la compañía Pickett fabricó reglas de cálculo que viajaron en varias misiones Apolo como calculadoras de reserva para los astronautas que viajaban a la Luna. El ingeniero soviético Sergei Korolev utilizó una regla Nestler en el diseño de las naves espaciales Sputnik y Vostok. Esta regla era la favorita también de Albert Einstein.

Pero las reglas de cálculo tenían un talón de Aquiles: los modelos estándar ofrecían una precisión de sólo tres dígitos. Suficiente para calcular cuánto hormigón hay que verter en unos cimientos, pero no para determinar la trayectoria de una sonda espacial translunar. Y todavía peor: es preciso llevar la cuenta de la posición de la coma decimal. Una lectura de 3,46 en la regla puede significar tanto 34,6 como 3460 o 0,00346.

Esa coma decimal escurridiza le recordaba a todo ingeniero competente que debía comprobar un par de veces los resultados de la regla de cálculo. Primero se estimaba un valor aproximado y después se comparaba este valor con el número que señalaba el cursor. Al sentir los números de cerca, los usuarios tenían conciencia de los errores de redondeo y de las imprecisiones sistemáticas, a diferencia de lo que ocurre con los actuales programas informáticos de diseño por ordenador. Los ingenieros de los años cincuenta suelen recordar con nostalgia aquellos días en que los cálculos iban de la mano de una comprensión más profunda. En lugar de ir introduciendo números en un programa informático, el ingeniero comprendía los detalles finos de cargas y esfuerzos, tensiones y corrientes, ángulos y distancias. Los valores numéricos, calculados a mano, entrañaban la solución de problemas por medio del conocimiento y el análisis, en lugar de la mera molienda de números.

Aún con el cómputo moviéndose literalmente al ritmo de la mano y siendo conscientes de la falta de precisión, los matemáticos se pusieron manos a la obra para simplificar problemas complejos. Puesto que las ecuaciones lineales se prestaban mejor a las reglas de cálculo que las funciones de mayor complejidad, se hicieron grandes esfuerzos para linealizar las relaciones matemáticas, lo que a menudo consistía en barrer debajo de la alfombra computacional los términos de orden mayor o que tuvieran una importancia secundaria. Así, el diseñador de automóviles solía calcular el consumo de combustible fijándose, sobre todo, en la potencia del motor, sin tener en cuenta, por ejemplo, que la resistencia del aire depende de la velocidad. Se idearon atajos y reglas empíricas. Las medidas conducían, en el mejor de los casos, a ahorros de tiempo y a una comprensión o intuición más profunda. Por contra, estas aproximaciones ocultaban imprecisiones o eran causa de burdos errores.

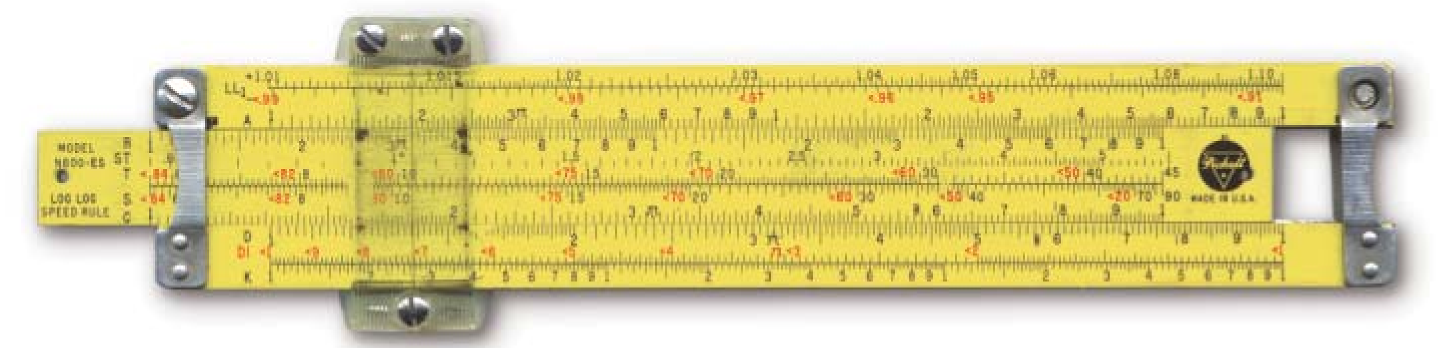
Dado que los ingenieros se basaban en cálculos imperfectos, tendían a diseñar sobre seguro. Las paredes se hacían más gruesas de lo necesario; las alas de los aviones, más pesadas de lo debido; los puentes, más resistentes. Tal proceder iba en beneficio de la fiabilidad y la durabilidad, pero suponía fuertes recargos financieros, rendimientos más pobres y, a veces, un funcionamiento torpón.

La dificultad de aprender a utilizar la regla de cálculo disuadió a la gente común de su empleo. Excepto en contados casos, las reglas de cálculo nunca se abrieron paso hacia la vida cotidiana, pues con ellas no se podían realizar meras sumas y restas, por no hablar de la dificultad de llevar el control de la coma decimal. Las reglas de cálculo siguieron siendo cosa de técnicos.

La caída de la regla de cálculo

Durante la primera mitad del siglo XX, las principales competidoras de las reglas de cálculo para tareas de cómputo fueron las calculadoras mecánicas basadas en





5. LA REGLA PICKETT N600-ES viajó hasta la Luna con las naves Apolo. Servía como instrumento de cálculo de reserva.

engranajes. Pero en los primeros años sesenta, la electrónica empezó a invadir su terreno. En 1963, Robert Raden, un californiano, desarrolló la Friden 130, una de las primeras calculadoras electrónicas transistorizadas. Esta máquina de sobremesa, que efectuaba sólo cuatro operaciones, dejó asombrados a los ingenieros por su capacidad para calcular silenciosamente con una precisión de 12 dígitos. Ragen recuerda que diseñó semejante maravilla electrónica utilizando solamente instrumentos de cálculo analógicos: "Determiné los valores de todos los elementos circuitales, desde las corrientes de polarización de los transistores hasta las líneas de demora de las memorias, con mi regla de cálculo Keuffel&Esser". La regla de cálculo ayudó a diseñar las máquinas mismas que acabarían dejándola fuera de uso.

A finales de los años sesenta se podía adquirir una calculadora portátil de cuatro operaciones por unos cuantos cientos de dólares. Un poco más tarde, en 1972, Hewlett-Packard construyó la primera calculadora científica de bolsillo, la HP-35. Esta máquina hacía todo cuanto pudiera hacer una regla de cálculo y bastante más. Su manual de instrucciones rezaba: "Desarrollamos la HP-35 con el propósito de proporcionarle una regla de cálculo electrónica y portátil de alta precisión. Pensamos que le gustaría disponer de un objeto que presumiblemente sólo pueden poseer James Bond, Walter Mitty, Dick Tracy y otros héroes de ficción".

Docenas de otros fabricantes se sumaron pronto a esta iniciativa. Texas Instruments llamó a su producto "Calculadora Regla de Cálculo". Faber-Castell, en un esfuerzo por cabalgar sobre ambas técnicas, lanzó al mercado una regla de cálculo con una calculadora al dorso.

La calculadora electrónica acabó con el reinado de la regla de cálculo. Keuffel&Esser clausuró sus máquinas grabadoras en 1975. Los demás fabricantes de renombre —Post, Aristo, Faber-Castell, Pickett— no tardaron en seguir la misma senda. Tras una larga tirada de unos 40 millones de unidades, la era de la regla de cálculo llegó a su fin. Perdidas en cajones de despachos y estudios, las reglas de cálculo han desaparecido casi por completo, junto con los libros de tablas de logaritmos de cinco cifras y los protectores de bolsillo.

Una regla de cálculo Keuffel&Esser de dos metros y medio cuelga hoy de la pared de mi estudio. Utilizada en tiempos para enseñar los misterios del cálculo analógico a los estudiantes de física en germen, nos retrotrae a días en los que todo científico tenía que ser diestro en la regla de cálculo. Ahora no es más que un recuerdo del tamaño de una tabla de surf, un icono de la obsolescencia computacional. Ya entrada la noche, cuando el silencio se adueña de la casa, la regla intercambia susurros con mi Pentium. "Ten cuidado", le advierte al microprocesador. "Nunca sabrás si le estás abriendo el camino a quien va a destronarte."

6. LA CALCULADORA DE BOLSILLO HP-35 firmó la sentencia de muerte de la regla de cálculo. Este aparato, introducido por la compañía Hewlett-Packard en 1972, costaba 395 dólares. Se valía de seis microcircuitos de integración a gran escala y contaba con una pantalla de diodos fotoemisores. Se alimentaba con pilas o mediante un adaptador a la red.

ERIC MARCOTTE (*arriba*); RICK FURR (*abajo*)

El autor

Cliff Stoll se doctoró en astronomía en la Universidad de Arizona. Trabajó en el Instituto Científico del Telescopio Espacial, el Observatorio Purple Mountain de China, el Observatorio Nacional de Kitt Peak, el Observatorio Keck y el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. El autor expresa su agradecimiento a Regina McLaughlin, Bob Otnes y Walter Shawlee por su ayuda a este artículo.

Bibliografía complementaria

A HISTORY OF THE LOGARITHMIC SLIDE RULE AND ALLIED INSTRUMENTS. Florian Cajori. Primera edición: 1909. Reedición por Astragal Press en 1994.

SLIDE RULES: THEIR HISTORY, MODELS AND MAKERS. Peter M. Hopp. Astragal Press, 1999.

Orígenes de la teoría de nudos

Las investigaciones modernas sobre nudos surgieron del esfuerzo de tres físicos escoceses de la época victoriana por aplicar ese conocimiento a las cuestiones fundamentales del universo

Daniel S. Silver

Tomemos un trozo de cordón, cerrémoslo uniendo sus cabos y entrelacémoslo consigo mismo: el resultado será un nudo.

La creación de nudos se nos antoja sencilla, pero la teoría de los nudos es en la actualidad uno de los campos más activos de las matemáticas; en los diez últimos años se han publicado miles de artículos en las revistas profesionales. Existe incluso una revista que trata exclusivamente de la teoría de nudos. Entre los motivos de tal popularidad se cuenta la convicción de que los nudos tienen profundas consecuencia en campos que no son matemáticos. La teoría de nudos se ha aplicado ya en disciplinas tan dispares como la mecánica cuántica y la genética. Y éstos son tan sólo los intentos más recientes de utilizar los nudos para desenredar algunos de los misterios de la ciencia.

De hecho, la teoría de nudos es fruto de una osada (y sumamente descarriada) tentativa de crear una "prototeoría del todo". Dos físicos escoceses del siglo XIX, William Thomson y Peter Guthrie Tait, creían que los elementos químicos eran tubos de éter anudados; dado el estado de la física en su tiempo, cabía pensar que nociones de ese estilo explicarían la naturaleza de los átomos y su forma de actuar. Un tercer físico escocés, James Clerk Maxwell, célebre por sus trabajos sobre el electromagnetismo, alentó a Thomson y a Tait a que desarrollasen esa "teoría de los átomos vorticiales".

Nunca habría pruebas convincentes de la teoría de Thomson, hoy olvidada. Pero sus denodados esfuerzos por aplicar la teoría de nudos a las cuestiones fundamentales de la ciencia, al conocimiento de la naturaleza última de la materia e incluso a la posibilidad de una vida ultraterrena, nos resultan hoy estimulantes. Es frecuente en nuestros días acusar a los científicos de que sus campos de investigación son demasiado restringidos. Aquel pintoresco triunvirato de físicos escoceses habría sido exonerado de tales cargos. He aquí la historia de un fracaso magnífico.

Historia de los nudos

El problema más importante en teoría de nudos consiste en determinar si dos nudos son, o no, el mismo. Matemáticamente, se acostumbra a considerar que dos nudos son idénticos si puede deformarse uno de ellos —mediante estiramiento o torsión, sin romperlo— hasta lograr que ambos ofrezcan exactamente el mismo aspecto. La demostración de que dos nudos son iguales no es demasiado complicada: basta deformar uno de ellos hasta que sea exactamente igual que el otro. Pero la demostración de que dos nudos son distintos es difícil, porque hay un número infinito de contorsiones posibles.

La teoría de nudos estudia también las concatenaciones de nudos entrelazados de una forma cualquiera. En la Roma clásica era frecuente que los mosaicos con que se decoraban los templos y las mansiones representasen concatenaciones. Los nudos y concatenaciones celtas, cuyos mejores ejemplos podemos ver en el Libro de Kells, aparecieron en Irlanda en siglo VII, y desde allí se difundieron hacia Escocia.

En el siglo XIX los nudos, amén de su interés estético, adquirieron importancia matemática. Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855), quien, hijo de un albañil, llegó a ser el matemático más eximio de su tiempo, descubrió una característica no trivial de las concatenaciones. En 1833, demostró que el número de "entrelazados" —lo que hoy se conoce como número de concatenación de dos nudos— puede calcularse mediante una integral. Gauss estudió los nudos con uno de sus doctorandos, Johann Benedict Listing (1808-1882), quien posteriormente acuñaría la palabra *topología*, combinación de las voces griegas *topos* (lugar) y *logos* (razón), para referirse a la nueva geometría de posición.



1. UN ANILLO DE HUMO SE ELEVA SOBRE EL ETNA. Este tipo de anillos son consecuencia de pequeñas emisiones de humo expulsadas por las angostas chimeneas del volcán. Pueden alcanzar diámetros de hasta 180 metros y permanecer estables durante más de 10 minutos. El físico escocés Peter Guthrie Tait efectuó en 1867 una serie de experimentos con anillos de humo, aunque a escala reducida muy parecidos en el fondo a lo que ocurre en el volcán, con el fin de comprender el movimiento vorticial. William Thomson (Lord Kelvin, años después), tras haber observado uno de estos experimentos, llegó a la conclusión de que las formas más elementales de materia debían de consistir en nudos estables y permanentes, animados de un movimiento vorticial. Los esfuerzos de Thomson y Tait dieron nacimiento a la teoría de nudos, que es en la actualidad una de las ramas más activas de la matemática. A la izquierda ofrecemos un círculo (un no-nudo) y un círculo retorcido sobre sí mismo que es topológicamente idéntico al círculo que vemos encima. El nudo trifolio (*abajo*) es el más simple de los nudos no triviales.

JUERG ALEAN (*arriba*); STEPHANIE FREESE (*abajo*)/*American Scientist*

Pero aunque Gauss y Listing sintieron curiosidad por los nudos, el progreso de esta disciplina exigía más que interés: alguien obsesionado por ellos.

Lord Kelvin

William Thomson fue un brillante matemático y físico, pero también una persona de desmesurada confianza en sí mismo. Siendo estudiante en Cambridge, tan seguro estaba de que iba a ser el *senior wrangler* (el estudiante con la máxima calificación en los duros exámenes de licenciatura en matemáticas de Cambridge), que tras hacer el examen le pidió a su criado que averiguase quién había sido el segundo clasificado. “Usted, señor”, fue la demoledora respuesta.

El abanico de intereses de Thomson era muy amplio. Desde los últimos años del decenio de 1850 hasta mediados del siguiente decenio, participó en la creación del primer cable telegráfico transatlántico; en 1866 recibió el tratamiento de *sir* por su contribución. (Se convertiría en Lord Kelvin, o más exactamente, en Barón Kelvin de Largs, 26 años después.) En 1858, mientras trabajaba en el cable transatlántico, inventó el galvanómetro de espejo.



Con este aparato, capaz de detectar las débiles corrientes eléctricas que circulaban por el cable con mayor facilidad que los instrumentos anteriores, se hizo rico.

Pero Thomson es conocido sobre todo por la escala de temperatura absoluta, que deriva de sus investigaciones más importantes, las que dedicó a la termodinámica, y que lleva su nombre: escala Kelvin. (Un reconocimiento menor: el refrigerador Kelvinator.) Tras leer un artículo de Sadi Carnot titulado "Reflexiones sobre la fuerza motriz del calor", propuso dos leyes de la termodinámica, que enunciaban la indestructibilidad de la energía. Toda la física, concluyó, habría de deducirse de principios energéticos.

Era característico de Thomson el gusto por estas conclusiones tan universales, lo cual le puso más de una vez en una situación difícil. En 1862 (antes del descubrimiento de la radiactividad) recurrió a los principios termodinámicos para estimar la edad de la Tierra, y llegó a la conclusión de que era mucho más joven de lo que creían los geólogos. A pesar de todas las pruebas en contra, entre ellas la teoría de selección natural de Darwin, Thomson se negó a aceptar que la Tierra pudiera tener más de 100 millones de años.

Llegado a la vejez, Thomson se hizo cada vez más refractario a los nuevos desarrollos científicos. David Lindley, en su apasionante biografía de Thomson, mantiene que éste, en sus años postreros, se había convertido en un chiflado, "un fósil viviente, una reliquia de una era olvidada". Thomson repudió la teoría del electromagnetismo de Maxwell, universalmente admitida, rechazó la radiactividad, se empeñó en que la Tierra sólo contaba 100 millones de años y se negó a aceptar la teoría atómica, que avanzaba a paso veloz. Pese a todo, fue, hasta el término de su larga vida, uno de los científicos británicos más brillantes.

P. G. Tait

Peter Guthrie Tait, a diferencia de Thomson, sí fue *senior wrangler* de su promoción en Cambridge. Nació en 1831. Pugnaz, discutidor, mantuvo una ardiente lealtad hacia Thomson. "Nunca nos conformamos con no estar de acuerdo", escribió Thomson en 1901, en el obituario de su eterno amigo y colaborador. "Discutíamos siempre. Pero el placer de discutir con Tait era casi tan grande como el de coincidir con él."

En 1860, el patronato de la Universidad de Edimburgo ofreció a Tait la cátedra de Historia Natural, que estaba vacante. Por su mayor capacidad docente, lo prefirieron a Maxwell, de superiores logros científicos. (J. M. Barrie, el autor de *Peter Pan*, que fue alumno de Tait, dijo en cierta ocasión que no creía que alguien hubiera podido alguna vez explicar mejor que Tait.)

Tait se sumó a la refriega sobre la edad de la Tierra, tomando partido por Thomson. Resumió su postura en una conferencia pronunciada en 1885, en la que sostuvo que la Tierra no podría tener una edad mayor de 10 o 15 millones de años. Y si tal cosa molesta a los geólogos, añadió, "tanto peor para la geología".

La ciencia de los anillos de humo

Los científicos victorianos, y entre ellos Thomson y Tait, creían en la existencia de un fluido perfecto al que llamaban éter, una noción con origen en Aristóteles. Tal medio parecía esencial para que, por ejemplo, el Sol pudiera ejercer su atracción gravitatoria sobre la Tierra. Thomson ansiaba encontrar un modelo mecánico del éter que explicara su interacción con los fenómenos físicos.

Thomson estaba también enzarzado con otra cuestión fundamental de su tiempo: ¿Qué son los átomos? La existencia de los átomos era cosa ampliamente aceptada, pero los detalles seguían siendo escurridizos. Thomson no podía aceptar que los átomos fuesen cuerpos duros y diminutos, una de las descripciones más comunes. ¿Cómo podrían los átomos, así concebidos, vibrar y emitir luz visible? Un experimento de Tait le sugirió otra caracterización.

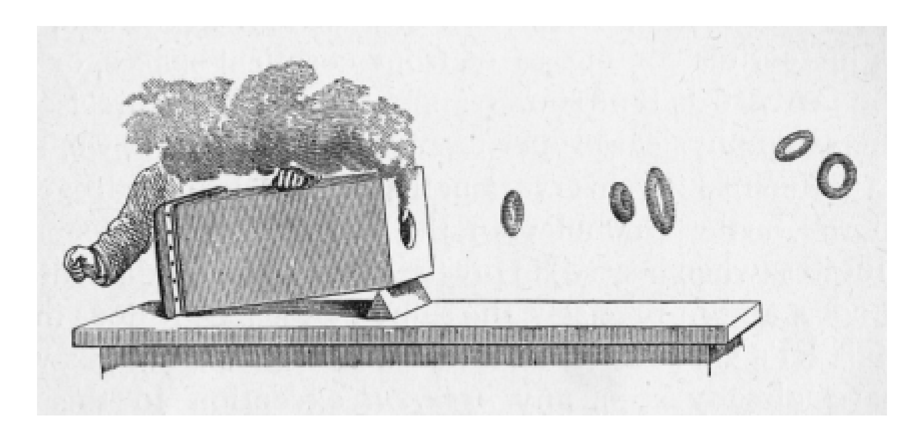
En 1867 Tait le mostró a Thomson la forma de hacer números de magia con anillos de humo. Tait sabía ya, por un artículo de Hermann von Helmholtz, que un vórtice anular sería estable y permanente en un fluido perfecto. El aire no es un fluido perfecto, pero Tait se contentó con un modelo aproximado. Hizo un agujero de buen tamaño en una de las caras de un cajón de madera y sustituyó la cara opuesta por una toalla estirada y bien tensa. Roció el interior de la caja con una disolución concentrada de amoníaco y colocó un plato que contenía sal común sobre la que había vertido ácido sulfúrico. Como Tait explicaría en una disertación siete años más tarde:

"Los dos gases se combinan y forman sal amoniacal (cloruro amónico) sólida. Cualquier cosa visible que salga de la caja no consistirá sino en partículas de sal amoniacal, tan pequeñas, que se mantienen suspendidas por fricción fluida, como el



STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

2. PETER GUTHRIE TAIT construyó en 1867 una caja para estudiar los anillos de humo. Una de las caras de la caja era una toalla tensa; abrió un boquete circular en la cara opuesta y puso amoníaco y ácido sulfúrico en el interior. Al golpear la toalla emergían aros de humo a través del boquete: cuando el humo llegaba a la abertura, se desplazaba hacia delante y luego hacia atrás en un movimiento circular a causa del empuje del aire exterior. Este patrón circular creaba un vórtice, que estabilizaba el aro de humo. Si el orificio no era circular, los anillos iban gradualmente adoptando la forma circular después de atravesarlo.



humo en el aire. Observemos ahora el efecto de un golpe seco aplicado a la cara de la caja opuesta al agujero."

El aire de la sala debió de ser acre. Cada vez que Tait golpeaba la toalla, emergían del agujero vórtices anulares, que vibraban violentamente, "como si fuesen anillos sólidos, de goma". Tait se maravillaba de su estabilidad. Cuando el agujero, en lugar de redondo, era cuadrado u ovalado, la forma del vórtice se estremecía y vibraba hasta adoptar la forma circular, a la que Tait consideraba "una posición de equilibrio estable".

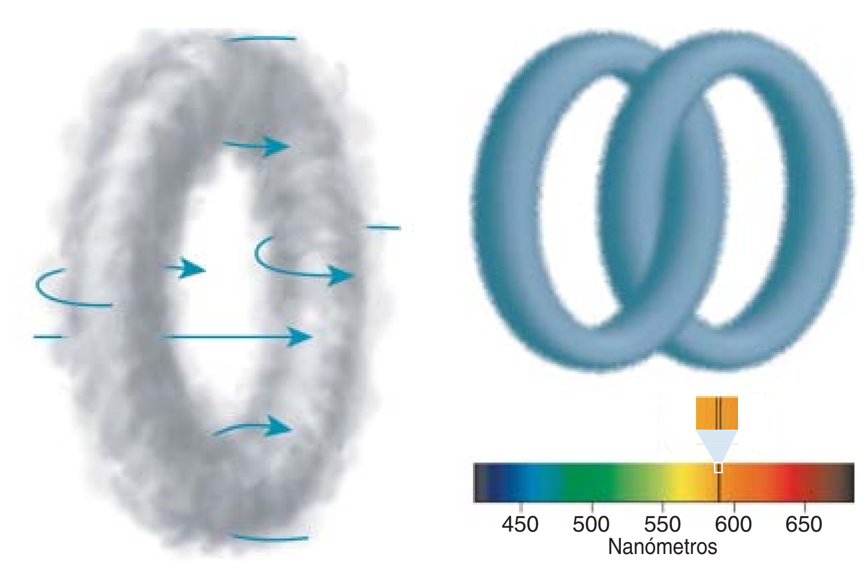
Tait trabajó mucho para perfeccionar su experimento de los anillos de humo. Al parecer, Thomson hizo otro tanto. En una carta de Tait a Thomson, fechada en 1867, le proponía algunas recetas letales:

"¿Has probado con aire puro en una de tus cajas? El efecto es muy sorprendente. Pero olvídate de NO_5 y Zn. Lo que va bien es SO_3 + NaCl. No te quedes corto con el NH_3: los vapores serán muy densos + no desagradables. El NO_5 es PELIGROSO. Introduce la cabeza en un anillo y percibe la corriente."

Más de 30 años después, Henri Poincaré habría de sostener que las combinaciones útiles de ideas son las más hermosas. Una "criba estética" subconsciente, pensaba Poincaré, se encargaba de que aflorasen esas hermosas asociaciones. Thomson, al ver cómo se deslizaban lentamente por la sala los anillos de humo de Tait, debió tener justamente una de tales inspiraciones: tal vez los bloques elementales de la materia fuesen vórtices anulares de éter. El movimiento de los vórtices, impartido por un creador divino, había fracturado el éter, por lo demás homogéneo, en componentes químicos: los elementos químicos serían tubos de éter anudados. El atractivo de esta teoría residía, en parte, en su simplicidad. Con ella, no se necesitarían hipótesis prolijas y fastidiosas para explicar las propiedades químicas, que serían resultado de la topología. La teoría, sencilla y hermosa, no podía dejar de ser verdadera.

Los elementos químicos, cuando se calientan hasta determinada temperatura, desprenden colores característicos: sus espectros de emisión. Thomson explicaba las "rayas D" del espectro del sodio suponiendo que este elemento consta de dos vórtices anulares concatenados de la forma más sencilla. En 1867, le escribía a Helmholtz:

"... podría existir toda variedad de combinaciones. Así pues, una larga cadena de vórtices anulares, o tres anillos, que pasen cada uno por el interior de cada uno de los otros, daría a cada uno de esos átomos cinéticos reacciones muy características con los otros."



3. LA TEORIA ATOMICA VORTICIAL DE WILLIAM THOMSON nació de sus observaciones de los experimentos de Tait con anillos de humo. Las flechas que rodean el anillo de humo de la izquierda indican el sentido de movimiento del vórtice. El aire presiona sobre la parte más externa del anillo, que tiene mayor superficie que el interior del aro, y desplaza el anillo en la dirección del aire que pasa por dentro del aro. En un fluido perfecto, como el éter, este movimiento vorticial sería permanente. Thomson propuso que el comportamiento de los átomos hallaría explicación si se tratara de nudos de éter dotados de movimiento vorticial. A título de ejemplo se valió del sodio. Pensaba que las distintivas "líneas D" de este elemento, un doblete de líneas de su espectro de emisión, podrían deberse a dos anillos de éter concatenados.

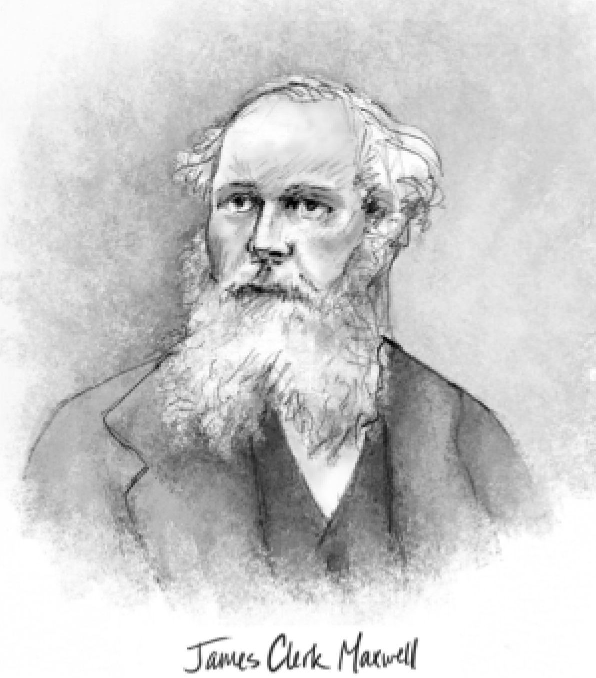
DE *RECENT ADVANCES IN PHYSICAL SCIENCE*; PETER GUTHRIE TAIT, "LECTURES ON SOME RECENT ADVANCES IN PHYSICAL SCIENCE" (*arriba*); STEPHANIE FREESE (*abajo*)/*American Scientist*



4. EN UN ARTICULO PUBLICADO EN 1858 Hermann von Helmholtz describió el movimiento de los anillos vorticiales en un fluido perfecto. Llegó a la conclusión de que si dos anillos situados en el mismo plano (*en la figura, uno azul y otro verde*) se movían en la misma dirección, el primer aro se agrandaría y perdería velocidad, mientras que el segundo se contraería y atravesaría al primero. El proceso se repetiría indefinidamente. Tait se valió de su caja de aros de humo para ilustrar las conclusiones de Helmholtz. Halló que podía reproducir esa interacción.

Tait expuso esa idea de los anillos vorticiales de Thomson en una serie de lecciones publicadas en 1874. Comparó las interacciones de los aros vorticiales con el efecto de arrastrar una cucharilla por la superficie del té en una taza. Al elevar la cucharilla y separarla de la superficie se crea "un par de pequeños remolinos que se moverán por el té, girando en sentidos opuestos". "Estos dos remolinos", continuaba diciendo, "son, sencillamente, los extremos de un semianillo vorticial".

"En un caso como ése puede haber extremos, porque estos dos extremos se encuentran en la superficie libre del líquido. Un anillo vorticial, pues, no puede tener extremos... y si adoptamos la idea de Thomson de que un fluido perfecto llena el espacio infinito, está claro que no puede haber extremos. Todos los anillos vorticiales —y por consiguiente, según Sir William Thomson, todos los átomos de materia— tienen necesariamente que carecer de extremos; es decir, sus cabos han de terminar por unirse después de cierto número de convoluciones o anudamientos."



Los detalles de la teoría de Thomson seguían siendo bastante vagos, pero la idea general encajaba maravillosamente con una visión dinámica del universo. La ciencia victoriana estaba imbuida de la filosofía mecánica de Newton. El matemático francés Pierre-Simon de Laplace se atrevió a afirmar que, si fuera posible conocer en un instante dado las fuerzas existentes en todos los puntos del universo, se podría predecir el futuro y conocer el pasado. Dios, al parecer, sería un jugador de billar que se tomaba un descanso después de una tacada especialmente acertada.

Las lecciones de Tait que se han publicado contienen una descripción detallada de sus experimentos con anillos de humo; en ellas da las dimensiones de las cajas y detalla los compuestos utilizados. Pero el texto y el grabado que lo acompaña sólo pueden ofrecernos una idea somera de lo que Tait y Thomson experimentaron. Por mi parte, decidido a captar el "efecto" —y el "aroma"— del experimento, construí mis propias cajas de humo y pasé una tarde bien peculiar intoxicándome. Mis colegas Andrzej Wierzbicki y Susan Williams y yo estuvimos zurrando cajas llenas de los humos combinados de ácido y amoníaco. Los anillos temblaban y vibraban al salir al exterior, pero al aumentar de diámetro, que en ocasiones superaba los 50 centímetros, se volvían estables. La visión de los anillos navegando plácidamente por la sala debió de resultarle sumamente satisfactoria a Tait y Thomson. No tanto los vapores corrosivos.

dp/dt

James Clerk Maxwell era alegre, bienhumorado, atlético y brillante conversador. Tait y Maxwell se conocieron de estudiantes en la Academia de Edimburgo. Posteriormente, ya colegas, los dos amigos se escribían casi a diario mediante las nuevas tarjetas postales de medio penique. El correo se repartía con diligencia, por lo que resultaba posible enviar una postal y recibir respuesta en el mismo día. Se han conservado, por fortuna, muchas de las postales que Maxwell envió. A menudo utilizaba unas abreviaturas bastante crípticas: Thomson era T, Tait era T' y John Tyndall, un divulgador científico de éxito a quien Maxwell y Tait consideraban un mediocre, T'', una broma entre ellos que sugería que Tyndall era "una magnitud de segundo orden". El propio Maxwell firmaba dp/dt, por una ecuación de la termodinámica que se resumía en sus iniciales: JCM = dp/dt.

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

Es verosímil que el profundo interés de Maxwell por los nudos y por la topología se debiera a la teoría de los átomos vorticiales de Thomson y a la influencia de Tait. En una postal dirigida a Tait en noviembre de 1867, Maxwell da a entender que había estado reflexionando sobre los artículos de Helmholtz sobre los nudos y el movimiento de los vórtices, con toda probabilidad en razón de sus consecuencias para la electricidad y el magnetismo.

En una carta escrita al mes siguiente, relataba Maxwell: "He estado entreteniéndome unos días con curvas anudadas". A continuación explicaba que el número de enlace de dos nudos posee significado físico. Al hacer pasar corriente eléctrica por uno de los nudos se genera un campo magnético. El número de enlace es, esencialmente, el trabajo realizado por una partícula cargada que se mueve a lo largo de la trayectoria definida por el segundo nudo. Maxwell expresaba el número de enlace mediante una integral doble que Gauss había descubierto con anterioridad.



5. JAMES CLERK MAXWELL, que era amigo de Thomson y de Tait, se interesó por su trabajo sobre vórtices y utilizó su zoótropo para examinar las interacciones de tres anillos. Al girar el zoótropo, los observadores que mirasen a través de las aberturas del cilindro percibirían que los anillos dibujados en la banda interior pasaban unos a través de otros, de la forma descrita por Helmholtz para dos anillos.

KELVIN FAGAN, *Laboratorio Cavendish/American Scientist*

El profundo interés de Maxwell por los nudos y sus concatenaciones se manifiesta en cartas y notas suyas publicadas recientemente. Entre estos papeles hay transparencias estereográficas de nudos, que habían de observarse mediante un estereoscopio mejorado por el propio Maxwell. Aparece también una fotografía de un zoótropo, o rueda de la vida. Su diseño se describe en una biografía de Maxwell escrita en el siglo XIX:

"En el instrumento ordinario, al mirar por las rendijas del cilindro giratorio vemos moverse las figuras sobre la superficie opuesta del cilindro. Maxwell insertó, en vez de rendijas, lentes cóncavas, cuya distancia focal era tal, que la imagen virtual del objeto situado en el otro extremo del diámetro se formase en el eje del cilindro y, consiguientemente, pareciera quedar estacionaria durante la rotación del cilindro."

Un examen atento de las figuras dibujadas a mano que vemos en la fotografía del zoótropo de Maxwell nos revela que consistían en tres anillos simples, que representaban aros de humo. Helmholtz, en su artículo de 1885, había descrito la interacción entre dos vórtices anulares que viajasen en la misma dirección:

"Si su rotación es del mismo sentido y viajan en la misma dirección, el que vaya por delante se ensanchará y viajará más lentamente; el perseguidor se contraerá y viajará más deprisa hasta que, por fin, si sus velocidades no difieren demasiado, alcance al primero y penetre en él. Después ocurrirá lo mismo en orden inverso: los anillos irán pasando alternativamente cada uno a través del otro."

Maxwell, tras haber apreciado el *pas de deux*, se propuso comprender la danza en trío. En una carta dirigida a Thomson, de 6 de octubre de 1868, anunciaba que las conclusiones de Helmholtz seguían siendo válidas para tres anillos.

A pesar de la vertiginosa celeridad de su pensamiento y de su brillante mente, Maxwell mantuvo siempre un tono mesurado y objetivo en todos sus escritos. No se puede decir lo mismo de su amigo Tait.

El universo que no vemos

El éxito de la concepción mecánica del universo creada por Newton era motivo de orgullo nacional para la Gran Bretaña de la era victoriana. Pero la filosofía materialista que engendró fue causa asimismo de no poca inquietud. Pues si todos los fenómenos eran susceptibles de explicación científica, también podrían serlo los milagros. La certidumbre de la Revelación quedaría en tela de juicio.

Una reacción muy difundida fue el interés por el espiritismo, que alcanzó notable predicamento en Gran Bretaña hacia 1870. La Sociedad para las Investigaciones Psíquicas, fundada en 1866, contaba con William Gladstone, Lewis Carroll, John Ruskin, Alfred Lord Tennyson y otros victorianos prominentes. Se empeñaron en afianzar el credo religioso por medio de la ciencia. Había quienes tenían incluso la esperanza de demostrar la existencia de vida tras la muerte.

William Kingdon Clifford y algunos más habían proclamado su escepticismo, cuando no su ateísmo. John Tyndall, un campeón del materialismo, indignó a muchos de los asistentes al congreso de la Asociación Británica celebrado en Belfast en 1874 al sostener en su discurso que la ciencia había de estar divorciada de la doctrina religiosa. Los argumentos religiosos sobre la naturaleza del universo, afirmaba, deberían aceptar su inferioridad frente a las explicaciones científicas.

Semejante tesis provocó la ira de Tait, quien respondió publicando, en coautoría con Balfour Stewart, un físico de Belfast, una apresurada tentativa de justificación y reivindicación de los milagros, de los espíritus y sobre todo de la vida ultraterrena titulada *The Unseen Universe* (El universo que no vemos). Esta obra, a pesar de sus limitaciones literarias y científicas, fue un éxito comercial.

Una secuela, *Paradoxical Philosophy*, llegaría poco después.

En pocas palabras: Tait y Stewart sostenían que, si bien el éter que nos rodea es imperfecto, existen universos paralelos que cuentan con un éter más perfecto. Presentaban en un diagrama una serie de círculos concéntricos, cuyo círculo más interior representaba un "aro evanescente de humo", el siguiente era representación de nuestro mundo, es decir, del "universo visible", y cada anillo mayor iba denotando un "universo invisible" progresivamente más perfecto.

"Lo mismo que el aro de humo se desarrolló a partir de moléculas ordinarias", explicaban, "podemos imaginar que las moléculas ordinarias se han desarrollado a partir de vórtices anulares de algo muchísimo más tenue y sutil que ellas mismas. Hemos convenido en llamarlo universo invisible". Si retrocedemos infinitamente, sostenían estos autores, llegaremos a "un universo que posee energía infinita y cuya inteligente actuación desarrolladora posee energía infinita".

Tait y Stewart creían que los pensamientos provocaban perturbaciones moleculares que se propagaban al mundo siguiente. Las vibraciones de nuestro mundo se disipaban y desvanecían, pero transmitían al dominio etéreo perfecto un movimiento eterno. Mezclaban argumentos técnicos sobre la termodinámica con las palabras de San Pablo. Mal puede sorprender que el lomo y la primera página del libro estuviesen decorados con un nudo trifolio.

Vemos en *The Unseen Universe* que Tait no limitaba su interés a las cuestiones matemáticas sobre los nudos. Abrigaba la esperanza de responder las preguntas más peliagudas sobre la consciencia, el alma y la vida ultraterrena. "La religión nos informa sin duda... de que existen otros seres superiores al hombre, pero no moran en el universo visible, sino en aquel que es invisible y eterno." Así pues, concluían los autores, "hemos alcanzado el estadio desde el cual podemos muy fácilmente eliminar toda dificultad científica en lo que concierne a los milagros". La recensión de Clifford en *Fortnightly Review* fue muy crítica, según cabía prever; en ella hablaba de "la reposada idea de un diván universal, donde esos seres inteligentes soportan el tedio de la eternidad expeliendo aros de humo por sesenta y tres clases de bocas".

Maxwell, al igual que Tait, era profundamente religioso, pero mantenía sus creencias en su fuero interno. Si bien admiraba la teoría de los vórtices atómicos, se mostraba escéptico con los esfuerzos de Tait de usarlos en defensa de ideas religiosas. En carta dirigida a Tait en 1878, comentaba sardónico: "Si estás pensando en ampliar la colección de himnos que ofreces en la obra original [*The Unseen Universe*], no te olvides de insertar '¡Cuán feliz podría ser con Eter!'" (Maxwell jugaba ahí con el título de una de las canciones de la *Beggar's Opera* de John Gay.)

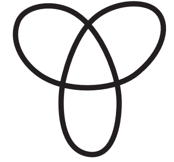
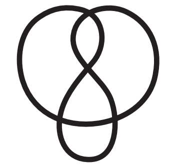
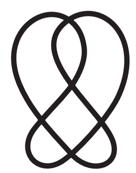
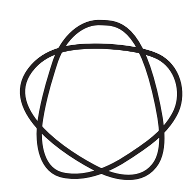
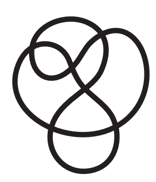
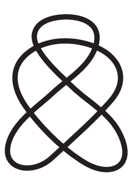
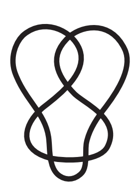
Pocos meses después, Maxwell reseñaría *Paradoxical Philosophy* en *Nature*. Volvería en esa ocasión a poner en tela de juicio el nexo de los argumentos religiosos y los argumentos científicos:

"Ejercitar la mente en especulaciones sobre [el éter] puede constituir una ocupación deliciosa para quienes se hallen intelectualmente dotados para permitírselo, pero no alcanzamos a ver por qué habrían de apropiarse para ello de las palabras de San Pablo por motivo alguno... Ningún descubrimiento nuevo puede hacer que el argumento contra la existencia personal del hombre después de la muerte sea más vigoroso de lo que siempre ha parecido desde que los humanos empezaron a morir."

Maxwell se permitió una pulla más zumbona sobre las especulaciones de Tait en un poema, parte de una carta a éste, que empezaba: "Es mi alma un nudo enredado, sobre un líquido vórtice forjado". No refrenaría Maxwell las pulsiones espirituales

6. EN *THE UNSEEN UNIVERSE*, sus autores, Tait y Balfour Stewart, formulaban hipótesis sobre la naturaleza del universo. A la manera de un anillo de humo compuesto por moléculas ordinarias, estas moléculas podrían ser anillos vorticiales de "algo mucho más fino y sutil que ellas". En este boceto, el círculo más interior representa un anillo de humo en el seno de nuestro universo visible (*1*). Por idéntico motivo, nuestro universo es una parte mutable de un universo más perfecto (*2*), el cual, a su vez, forma parte de otro más perfecto todavía (*3*), y así sucesivamente, hasta alcanzar un universo dotado de "energía infinita" y creado por un agente divino.

7. TAIT, TRATANDO DE DESARROLLAR UNA TABLA de los elementos químicos basada en la teoría vorticial de los átomos, empezó a clasificar los nudos según el número de cruzamientos. Los siete nudos más sencillos (*abajo*) tienen hasta seis cruzamientos. Tait llegó a construir tablas para nudos de hasta 10 cruzamientos. Las tablas actuales cubren hasta 16 cruzamientos y contienen más de 1.700.000 millones de entradas.

BELFOUR STEWART Y P. G. TAIT, "*THE UNSEEN UNIVERSE, OR, PHYSICAL SPECULATIONS ON A FUTURE STATE*", *Universidad de Unseen (arriba)*; STEPHANIE FREESE *(abajo)/American Scientist*

de su amigo, pero sí informaría e inspiraría las indagaciones de Tait en la matemática de los nudos y las concatenaciones.

El programa de Tait

Tait emprendió en 1878 un ambicioso programa de catalogación de nudos, que, si la teoría vorticial de los átomos hubiese sido correcta, habría constituido una suerte de tabla de los elementos. Tait carecía de técnicas rigurosas para demostrar que sus dibujos representaban nudos distintos, pero sí poseía osadía y una atinada intuición geométrica. (En el decenio de 1920, las técnicas elaboradas por Henri Poincaré y James Alexander permitieron comprobar que las tablas de Tait eran en esencia correctas.)

Tait seguía insatisfecho tras haber preparado las tablas de los nudos que se pueden dibujar con un máximo de seis cruzamientos. El problema estribaba en el elevado número de líneas espectrales de ciertos elementos, lo que significaba que los correspondientes átomos vorticiales tenían que ser muy complejos. Confeccionó entonces una tabla de "los primeros siete órdenes de anudamiento" (nudos que contaban hasta siete cruzamientos), pero incluso esto resultaba insuficiente.

"No es probable", escribió Tait, "que puedan abordarse los nudos de ocho o más cruzamientos mediante un proceso riguroso mientras no se simplifiquen inmensamente los métodos". Sería necesario que alguien contara "con la tranquilidad requerida" para ampliar la lista. Hubo quienes, inspirados por Tait, se pusieron manos a la obra. El reverendo Thomas P. Kirkman le envió una lista de nudos con 10 cruzamientos que contenía redundancias. Tait trabajó duramente para expurgar los duplicados. Cuando Charles Little, de la Universidad estatal de Nebraska, le envió a Tait su propia lista, había alguna ligera discrepancia, aunque Tait logró descubrir su único error antes de publicarla. Kirkman le envió a Tait otra lista de 1511 nudos con 11 cruzamientos; Tait decidió, empero, que no podía dedicar más tiempo al proyecto.

Otros retomarían su labor. La tabulación prosigue, aunque ya no sea la única tarea de la teoría de nudos. Las tablas actuales llegan hasta los 16 cruzamientos y contienen alrededor de 1.700.000 entradas. Morwen Thistlethwaite, de la Universidad de Tennessee, está cerca de concluir una tabla de nudos con 17 cruzamientos.

El significado de los nudos

La confianza y el juicio estético de Thomson se combinaron con el entusiasmo de Tait y su personalidad filosófica y fomentaron el primer programa sostenido de investigación de la teoría de nudos. Maxwell contribuyó también con las ideas y el aliento que le proporcionó sin cesar a Tait.

La investigación en teoría de nudos continúa sin la teoría de los vórtices atómicos, que se ha esfumado como los aros de humo de Tait. En 1889, Thomson aún seguía poniendo esperanzas en ella, a juzgar por el discurso que pronunció en calidad de presidente de la Institución de Ingenieros Eléctricos. Casi podemos imaginarle pensando:

"Y en este punto me temo que he de concluir diciendo que tan grandes son las dificultades que hay en el proceso de creación de algo que se parezca a una teoría comprensiva, que no podemos imaginar siquiera un indicador que señale un camino que nos lleve hacia la explicación. No me excedo al expresarme así. Sólo puedo decir que en este momento no podemos imaginar cuál pueda ser. Pero el año que viene, cuando volvamos a reunirnos —o dentro de diez años, o de cien, quién sabe—, probablemente resulte tan sencillo de comprender como entendemos este vaso de agua, claro y simple. No me cabe duda de que estas cosas, que ahora tenemos por misteriosas, no lo serán en absoluto; que se nos caerán las legañas de los ojos, que aprenderemos a ver las cosas de un modo diferente, cuando lo que hoy constituye una dificultad sea entonces la única forma razonable e inteligible de considerar la cuestión."

La teoría de los vórtices atómicos supuso la primera tentativa de dar una aplicación física a la teoría de nudos. Desde entonces, las técnicas de esta teoría se han abierto paso hasta la dinámica de fluidos, la física solar, la investigación del ADN y la computación cuántica. Aun así, la importancia y significado físico de los nudos sigue escapándosenos.

Cabe en lo posible que un nudo, lo mismo que su pariente más simple, el círculo, represente una relación fundamental de magnitudes. Dos mil años de reflexión sobre la geometría euclídea han producido muchas aplicaciones abstractas. Se precisarán algunos años más de reflexión para liberarnos de una visión sobremanera literal de los nudos y sus concatenaciones. Cuando finalmente comprendamos su naturaleza más honda, florecerán profundas aplicaciones físicas.

El autor

Daniel S. Silver, doctor en matemáticas por la Universidad de Yale, estudia la relación entre los nudos y los sistemas dinámicos. Entre sus otros intereses se cuentan la historia de la ciencia y la psicología de la invención. Enseña en la Universidad de Alabama.

Bibliografía complementaria

TOPOLOGY, MATTER AND SPACE, I: TOPOLOGICAL NOTIONS IN 19th CENTURY NATURAL PHILOSOPHY. M. Epple en *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 52, págs. 297-392; 1998.

THE FIRST 1,701,936 KNOTS. J. Hoste, M. Thistlewaite y J. Weeks en *The Mathematical Intelligencer*, vol. 20, págs. 33-48; 1998.

GEOMETRICAL ASPECTS IN THE DEVELOPMENT OF KNOT THEORY. M. Epple en *History of Topology*, págs. 301-358. Recopilación de I. M. James. North-Holland; Amsterdam, 1999.

THE SCIENTIFIC LETTERS AND PAPERS OF JAMES CLERK MAXWELL. Dirigido por P. M. Harman; 3 volúmenes. Cambridge University Press; Cambridge, 1990, 1995, 2002.

DEGREES KELVIN: A TALE OF GENIUS, INVENTION, AND TRAGEDY. D. Lindley. Joseph Henry Press; Washington D.C., 2004.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Círculos de piedras

En las regiones árticas, los efectos del frío sobre el relieve son espectaculares: el hielo hincha los "pingos" —montecillos de varias decenas de metros de alto—, criba las piedras y las dispone en figuras regulares que ocupan centenares de metros cuadrados. Vamos a descubrir los mecanismos que moldean estos paisajes.

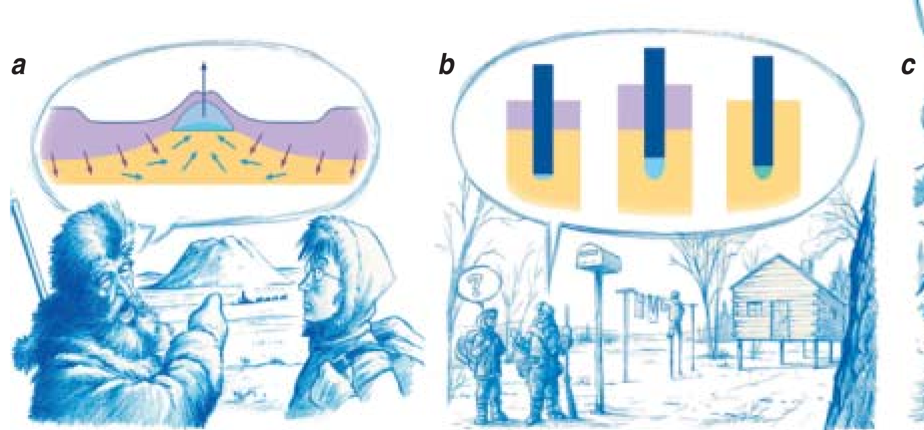
Cuando la temperatura de la atmósfera baja a menos de 0 ºC, el suelo se hiela comenzando por la superficie: la zona que se halla a 0 ºC se va corriendo hacia abajo. Esta "onda de helada" deja a temperaturas negativas las zonas situadas sobre ella. La transformación del agua en hielo con el paso de la onda ejerce unos efectos tanto más considerables cuanto más húmedo está el suelo, ya que la densidad del hielo es menor que la del agua: en el momento de la helada, el volumen del hielo es, a presión constante, un nueve por ciento mayor que el del agua.

El hielo ocupará el lugar del aire en las anfractuosidades del suelo. Si no encuentra espacio, su formación genera unos esfuerzos mecánicos muy fuertes. En el caso extremo de que se congele agua a volumen constante, la presión aumentará tanto, que todo obstáculo al aumento de volumen será abatido o quebrado, y el terreno móvil resultará comprimido y compactado. Los agregados de rocas más frágiles se disgregarán y el terreno se tornará pulverulento. Las rocas porosas o que presenten algunos intersticios en los cuales pueda infiltrarse agua se romperán.

Los pingos

Cuando el suelo se halla empapado de agua, el aumento de volumen elevará el suelo algunos centímetros. En las regiones de frío intenso, como Alaska o Siberia, el efecto puede ser impresionante. Cuando la onda de helada encuentra una bolsa de agua, o si el terreno está empapado de agua, crea en el terreno, al avanzar, una fuerte sobrepresión hidrostática que se transmite a todo el subsuelo y eleva la superficie del terreno donde sea más frágil y ligero. Ahí se creará una bolsa de agua que crecerá mientras la progresión de la onda mantenga una presión suficiente. Simultáneamente, el agua de la bolsa se helará y, al solidificarse, aumentará aún más de volumen y levantará un montículo, o pingo, palabra inuit que significa colina. El pingo crecerá año tras año, hasta una altura de decenas de metros. Cuando cese la alimentación de agua, se deshinchará.

A los mecanismos expuestos se suma otro más sutil, el criobombeo. Cuando se forma el hielo, la cantidad de agua presente en el terreno al nivel de la onda de helada disminuye. El terreno se deseca, como cuando en el verano se evapora el agua. A causas parecidas, efectos similares: si los poros del terreno son lo bastante estrechos, el agua líquida subirá por capilaridad desde las profundidades, tal y como lo haría en una esponja



El aumento de volumen del agua cuando se hiela crea una sobrepresión en el suelo. El agua expulsada por la formación de hielo (de volumen mayor que el agua) en la zona congelada (*malva*) sube a la superficie levantando el suelo (*a*). Cuando esa agua se hiela, forma una lenteja de hielo (*azul*) y constituye el núcleo de un "pingo"; esa lenteja se forma también bajo una piedra o bajo un poste, que estarán más fríos que el suelo circundante, ya que su conductividad térmica es mayor. La lenteja de hielo bombea el agua circundante y, al crecer, empuja el poste hacia arriba (*b*). Cuando deshiela, el poste no vuelve a descender del todo. Cerca de una acumulación de piedras (*c*), la onda de hielo ya no avanza verticalmente, sino al bies. Las lentejas de hielo empujan las piedras, que engrosan el amontonamiento.





M. A. KESSLER Y B. T. WERNER

seca. Sin embargo, con la evaporación hay una diferencia de importancia. En verano, el agua que se evapora abandona la superficie del suelo, mientras que el agua que se congela se queda en el mismo lugar. Así, un terreno húmedo no permanece homogéneo al helarse: el criobombeo favorece la aparición de lentejas de hielo que engordan y elevan el terreno mientras desecan y comprimen las capas inferiores.

Formación de círculos

En un terreno pedregoso, la formación de esas lentejas provocará una especie de clasificación de los materiales. Para comprenderlo, analicemos la propagación de la onda de helada en un pedregal. La formación de un gramo de hielo requiere que se le quite al agua centenares de veces más energía que la necesaria para rebajar en un grado la temperatura de un gramo de terreno ordinario. Así pues, la onda de helada progresa mucho más deprisa en las piedras (secas) que en la tierra (húmeda), puesto que el calor a evacuar es menor. Y además la conductividad térmica de las piedras es mucho mejor que la de un terreno blando: por ejemplo, el granito conduce el calor cinco veces mejor que la arena seca. En una piedra cuya cara superior sea alcanzada por una onda de helada, la temperatura descenderá casi inmediatamente a cero en todo el volumen. En ese lapso, la onda de helada no desciende casi nada. La base de la piedra, pues, se halla a cero grados mientras que el terreno a su mismo nivel sigue más caliente; por tanto, las lentejas de hielo se forman preferentemente en las piedras. Cada lenteja aspira el agua circundante por criobombeo. Cuando ese agua llega a la altura de la lenteja de hielo, se congela, aumenta de volumen y empuja la piedra hacia arriba. En el deshielo, la cavidad se llena de agua y de residuos; la piedra en sí no vuelve a descender, pues se queda generalmente adherida al terreno por la cara superior y los costados. Así, en cada ciclo helada-deshielo, la piedra sube un poco hasta que al final llega a la superficie del suelo. Crioextracción se llama a este proceso. Puede darse en cualquier latitud mientras haya suficientes días de helada al año. Pero el fenómeno adquiere toda su importancia en los climas árticos. Si no se tiene cuidado, los pilares hincados en el suelo o los oleoductos enterrados serán empujados hacia arriba con el paso de los años.

En un pedregal genuino, las consecuencias resultan aún más asombrosas. Primero, hay una segregación en función del tamaño de los guijarros: las piedras mayores se encuentran en la superficie mientras que las más pequeñas quedan debajo. Después, por las razones ya expuestas, la onda de helada penetra más deprisa en una zona de acumulación de piedras. La onda de helada ya no es horizontal, sino inclinada: sigue el contorno de la zona rica en piedras. A causa de esa inclinación, las lentejas de hielo ya no se forman en la vertical de las piedras, sino en la perpendicular a la onda de helada. En el curso de las alternancias helada-deshielo, las piedras reciben un empuje lateral y engrosan la acumulación. Por último, esta misma evolucionará: comprimidos sus costados por las lentejas de hielo durante los períodos de helada, tenderá a aflorar del suelo. Como las tensiones son más fuertes donde más espesa es la capa de piedra, el montículo tiene su cima en la vertical de esos espesores mayores. Las diferencias de altura en la superficie provocan desprendimientos que redistribuyen las piedras desde las zonas espesas hasta las más delgadas.

Poco a poco, la acumulación se alarga y transforma en una vena larga. Según la naturaleza exacta del suelo y los climas, estas venas de piedra se organizan en círculos, laberintos o polígonos de piedra, toda una suerte de estructuras que encontramos en los climas árticos y en las montañas. El efecto es espectacular cuando las piedras que se criban de ese modo tienen unas medidas de varios decímetros o más. La naturaleza tiene también sus *Stonehenge*, como vemos en la fotografía de las estepas heladas de Spitsbergen, en Noruega, que ilustra este artículo.

Juan M.R. Parrondo

Otras formas de contar

"El reciente censo invernal de aves acuáticas ha contabilizado en Doñana 164.131 ejemplares." "El número de ballenas jorobadas en Baja California es aproximadamente 1450." ¿No se han preguntado nunca cómo se obtienen estos números? ¿Hay alguien que cuenta pacientemente todas las aves o ballenas que pasan delante de sus narices? Y si es así, ¿cómo se las apaña para no contar dos veces el mismo animal?

La primera operación matemática que aprendemos es la de contar y cualquiera sabe hacerlo hoy en día. Sin embargo, lo que no todo el mundo sabe es que hay maneras más inteligentes de contar que la mera enumeración de objetos o individuos.

Para realizar censos de animales, se conoce desde el siglo XIX una técnica bastante ingeniosa: *el método de captura-recaptura*. Supongamos que queremos saber el número de peces de un estanque. Pescamos un cierto número de ellos, digamos 100 (cuanto más alto, mejor). Marcamos estos peces capturados de alguna forma y los soltamos de nuevo en el estanque. Esperamos un tiempo suficientemente largo para que los peces marcados se mezclen con el resto —por ejemplo, una semana—, y volvemos a capturar 100 peces. De ellos, algunos estarán marcados, por ser peces "recapturados", y otros no. La proporción de peces recapturados nos indicará la población total en el estanque. En efecto, si hay en total N peces y he marcado 100, la probabilidad de pescar en la segunda captura un pez marcado será $100/N$. Por lo tanto, el número medio o "esperado" de peces recapturados es $100 \times 100/N$. Si n es el número de peces que realmente hemos recapturado, una buena estimación de la población total es:

$$N = \frac{100 \times 100}{n}$$

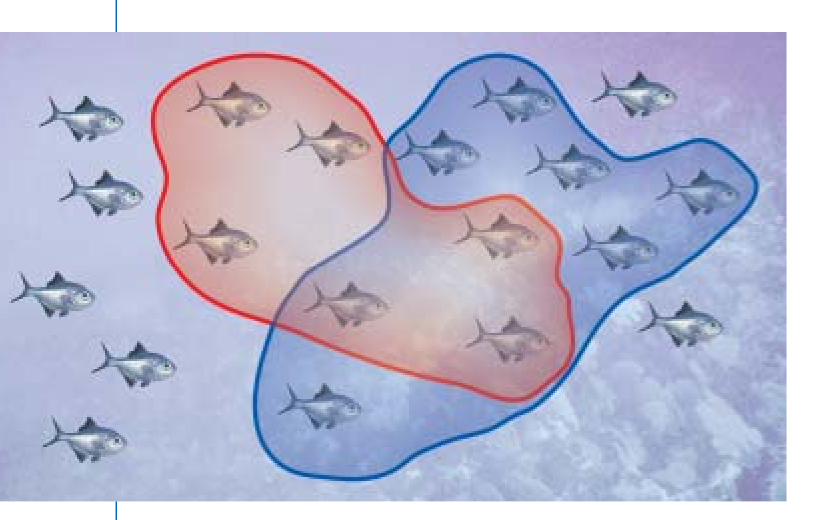
Es decir, si recapturo 20 peces, lo más probable es que la población total sea de unos 500. En general, si en la primera captura pesco n_1 peces y en la segunda n_2, de los cuales n_{12} resultan estar marcados, entonces la mejor estimación de la población total de peces es:

$$N = \frac{n_1 \times n_2}{n_{12}}$$

En la figura 1 podemos ver una representación esquemática del proceso.

Esta es la versión más simple del método de captura-recaptura. Tal y como lo hemos formulado, son necesarias varias condiciones para que la estimación sea válida. En primer lugar, no sólo el número de peces debe permanecer constante entre las dos capturas (si no fuera así, no tendría sentido calcular dicho número), sino que no puede haber muertes o nacimientos de peces. Si los hubiera, la fracción de peces marcados en la segunda captura sería menor que esa misma fracción en el momento de soltarlos al estanque, es decir, inmediatamente después de la primera captura, puesto que algunos habrán podido morir entre las dos capturas. Ocurriría lo mismo si los peces pudieran abandonar el lugar de estudio, por ejemplo si fuera un río en lugar de un estanque. La segunda suposición es que las capturas tienen que ser completamente aleatorias. Esta aleatoriedad es en ocasiones difícil de conseguir, especialmente en la segunda captura, porque los peces marcados pueden haber "aprendido" a evitar las redes. En general, hay que asegurarse de que los animales marcados no tienen mayor o menor tendencia a ser recapturados que sus congéneres no marcados.

Los métodos más avanzados de captura-recaptura son bastante más complejos de lo que hemos descrito aquí y tienen en cuenta la posibilidad de muertes y nacimientos o de migraciones. Se basan no sólo en dos capturas, sino en un número arbitrario de ellas, después de las cuales los animales vuelven a soltarse. Conforman una "historia" para cada animal capturado. Estas historias suelen denotarse mediante cadenas de ceros y unos: un uno significa que el animal ha sido capturado y un cero significa que no lo ha sido. Por ejemplo, si se han realizado cinco capturas, la historia 01100 indica que el animal ha sido capturado en la segunda y tercera de ellas y se ha "escapado" en el resto, es decir, en la primera, cuarta y quinta. Cada animal tiene una historia. Incluso se puede asociar la historia 00000 a los animales que



En la primera captura (*línea roja*) hemos obtenido 6 peces. En la segunda (*línea azul*) hemos obtenido 9, de los cuales hay 3 marcados. La estimación del número total de peces es $6 \times 9/3 = 18$, ligeramente inferior al valor real, 19.

no han sido cazados en ninguna de las cinco capturas, aunque, a diferencia del resto de historias, no sabemos el número de animales con historia 00000. De hecho, este número es normalmente la incógnita que queremos conocer y se suele estimar a partir del número de animales con historias que contienen al menos un uno, dato que sí conocemos perfectamente de nuestro registro de capturas.

El caso más sencillo es el de dos capturas, sin considerar muertes o migraciones, situación a la que se denomina *sistema cerrado*. Las cuatro posibles historias se muestran en la siguiente tabla:

HISTORIA	NUMERO DE ANIMALES	PROBABILIDAD	NUMERO ESPERADO DE ANIMALES
11	x_{11}	$p \times p$	$N \times p \times p$
01	x_{01}	$(1 - p) \times p$	$N \times (1 - p) \times p$
10	x_{10}	$p \times (1 - p)$	$N \times p \times (1 - p)$
00	x_{00}	$(1 - p) \times (1 - p)$	$N \times (1 - p) \times (1 - p)$

En la tabla se indican el número de animales con cada historia y la probabilidad de que un animal haya sido capturado de acuerdo con dicha historia. En el modelo más simple, en el que no hay muertes, nacimientos ni movimientos de población, la probabilidad de ser capturado en cada ocasión es $p = n/N$, siendo N el número total de animales y n el número de animales capturados, que aquí hemos supuesto, por simplicidad, el mismo para todas las capturas. La probabilidad de cada historia se obtiene multiplicando la probabilidad de ser capturado o no en cada una de las capturas. Finalmente, la cuarta columna es simplemente N por la probabilidad y nos indica el valor esperado de animales en cada historia. A partir de los valores esperados y de los valores reales, puede estimarse el parámetro p y la población total N utilizando métodos estadísticos, como el llamado de *máxima verosimilitud*. Cuando hay sólo dos capturas, el resultado es el que hemos obtenido en el ejemplo de los peces.

El problema se complica si consideramos tres capturas y aún más si el ecosistema que estamos estudiando es *abierto*, es decir, si admitimos la posibilidad de muertes o migraciones. En este último caso, se suele suponer que el número total de animales se mantiene constante, al menos de forma aproximada, gracias a nacimientos o inmigraciones que compensan las pérdidas. Sin embargo, estas compensaciones, como ya hemos mencionado, hacen que las probabilidades de cada historia cambien. En la tabla de la derecha se pueden ver estas probabilidades. En ellas aparece un nuevo parámetro, v, que es la probabilidad de seguir vivo entre captura y captura.

Aunque estas probabilidades son bastante más complejas que las anteriores, el lector con algunos conocimientos de probabilidad podrá deducir cada una de las entradas de la tabla sin excesiva dificultad. Al igual que en el caso anterior, varios métodos estadísticos permiten encontrar los parámetros p, v o ambos que mejor ajusten los datos de la tabla. Con ello se obtiene una información valiosa acerca del número de animales y de su probabilidad de supervivencia en un período dado. Hay modelos aún más complicados que éste y que permiten obtener otras características, como el número de animales en celo, su duración, los períodos de anidación, etc. Incluso circulan en Internet varios programas gratuitos, como SURGE o MARK, que realizan estas estimaciones de modo automático, si previamente se elige el modelo a utilizar.

La investigación matemática sobre el método de captura-recaptura continúa. Por ejemplo, en un trabajo reciente, Ricardo García-Pelayo, de la Universidad Politécnica de Madrid, proporciona un método para dar no sólo una buena estimación de la población total, sino también el intervalo de error del resultado. De hecho, gracias a este artículo es como he tenido conocimiento de este tema.

El método de captura-recaptura se ha aplicado también a los seres humanos. Uno de los pioneros de este método fue Laplace, quien lo utilizó para estimar la población de Francia a principios del XIX. Pero, en el caso de los humanos, ¿cómo se realizan las "capturas"? Basta cualquier listado de una muestra de los individuos que se quieren "contar", siempre que la muestra sea suficientemente aleatoria. Por ejemplo, Antonia Domingo Salvany y su grupo, de la Universidad Autónoma de Barcelona, han estimado el número de heroinómanos en Barcelona utilizando estos métodos. Las tres "capturas" consistieron en tres listas: los ingresos en urgencias, las solicitudes de tratamiento de desintoxicación durante el primer semestre, y los ingresos en prisión en el segundo semestre. Según apareciera o no en cada una de estas tres listas, los investigadores asociaron a cada individuo una historia, tal y como hemos hecho en los ejemplos anteriores. Con estos datos, han obtenido finalmente la población total de toxicómanos, estuvieran o no registrados en alguna de las tres listas. En epidemiología la captura-recaptura es también un método muy utilizado para elaborar censos de distintas enfermedades.

HISTORIA	PROBABILIDAD (ECOSISTEMA CERRADO)	PROBABILIDAD (ECOSISTEMA ABIERTO)
111	$p \times p \times p$	$p \times vp \times vp$
110	$p \times p \times (1 - p)$	$p \times vp \times [v(1 - p) + (1 - v)]$
101	$p \times (1 - p) \times p$	$p \times v(1 - p) \times vp$
100	$p \times (1 - p) \times (1 - p)$	$p \times [v(1 - p) \times v(1 - p) + v(1 - p)(1 - v) + (1 - v)]$
011	$(1 - p) \times p \times p$	$(1 - p) \times vp \times vp$
010	$(1 - p) \times p \times (1 - p)$	$(1 - p) \times vp \times [v(1 - p) + (1 - v)]$
001	$(1 - p) \times (1 - p) \times p$	$(1 - p) \times v(1 - p) \times vp$
000	$(1 - p) \times (1 - p) \times (1 - p)$	$(1 - p) \times [v(1 - p) \times v(1 - p) + v(1 - p)(1 - v) + (1 - v)]$

En cualquier caso, el método está también sujeto a ciertas críticas. Las hipótesis en que se basa son en ocasiones demasiado restrictivas y, aun cumpliéndose, el error de la estimación final puede ser excesivo. Por otro lado, hay especies y ecosistemas en los que resultan mejores otras "formas de contar". Por ejemplo, cuando hay pocos individuos y se encuentran dispersos, es mejor realizar el recuento por pura inspección en las distintas zonas en donde habitan los animales. La Sociedad Española de Ornitología organiza cada año este tipo de censos para ciertas especies de aves en peligro de extinción con la colaboración de voluntarios de todo el país.

Mark Fischetti

RADIOGRAFIA DIGITAL

Mejora de la exposición

Los hospitales rebosan de escáneres digitales de resonancia magnética (RM) y tomografía computarizada (TC). Los aparatos de rayos X, en cambio, siguen siendo, en su mayoría, analógicos. Pero los equipos de radiografía digital se están abriendo camino; al igual que las cámaras digitales, están prestos para sustituir a una técnica fotográfica que cuenta con un siglo de existencia.

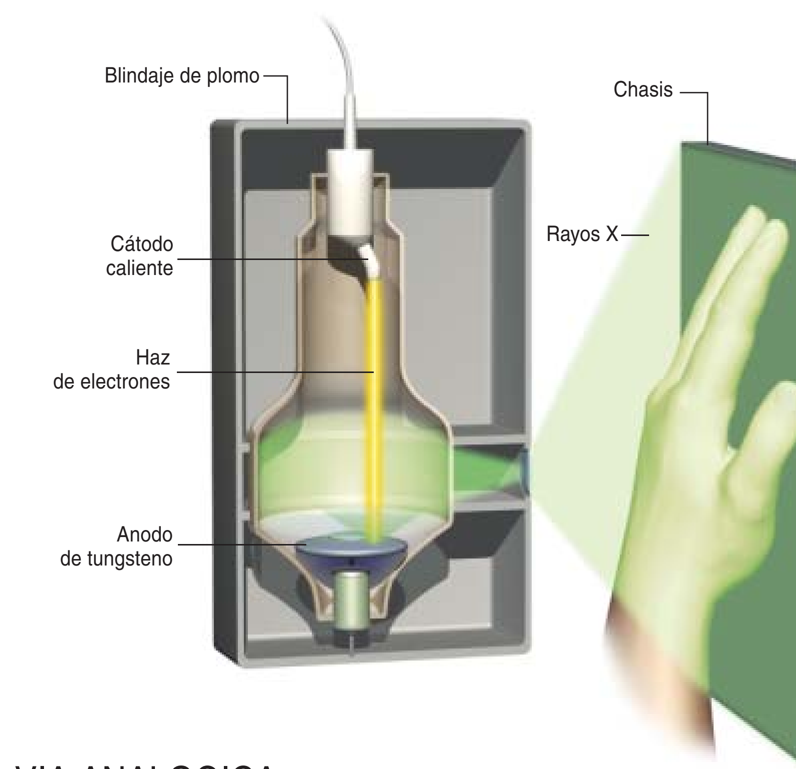
Para la formación de imágenes digital han surgido varias técnicas. Todas operan con un generador de rayos X clásico, pero en lugar de impresionar una placa fotográfica que luego deba revelarse químicamente en una cámara oscura, los receptores crean una imagen digital que se visualiza en una pantalla. Las conversiones directa e indirecta dan una lectura instantánea. En la conversión por estimulación, los rayos X quedan atrapados en un chasis portátil que se introduce en un lector aparte.

En la actualidad, los sistemas digitales cuestan varios centenares de miles de euros, mucho más que los sistemas analógicos. Sin embargo, la eliminación de las placas fotográficas y su procesado ahorra dinero y técnicos auxiliares. No hacen falta cámaras oscuras; miles de imágenes de pacientes se guardan en un ordenador, no en archivadores voluminosos. Las imágenes se recuperan al instante; por red, se envían a otros centros médicos. Un hospital recuperaría la inversión en cuatro o cinco años.

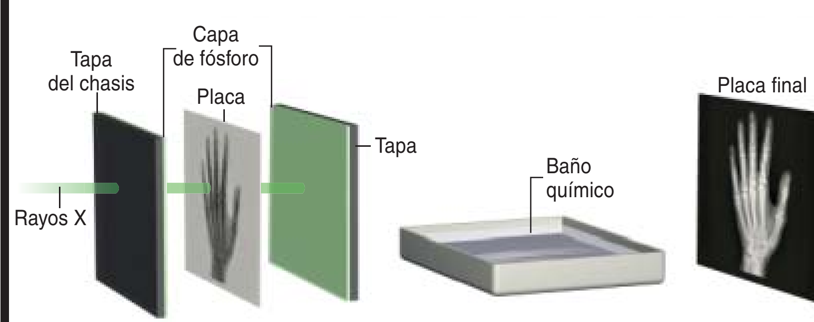
Las imágenes se manipulan para mejorar el contraste; ello facilita a radiólogos y cirujanos la detección de un nódulo de cáncer de pulmón detrás de una costilla, por ejemplo. Si tuvieran que hacerlo a base de fotografías, necesitarían varias tomas con rayos X. La calidad de las imágenes digitales es superior. Además, la calidad que ofrece una placa fotográfica, un equipo digital la consigue con la mitad de dosis de rayos X. Conforme crezca su aceptación, los sistemas digitales bajarán de precio.

Los detectores digitales han mejorado su funcionalidad a lo largo de los últimos cinco años. Los fabricantes han refinado los procedimientos para la deposición, precisa y uniforme, de sustancias sensibles a los rayos X sobre sustratos de gran superficie; asimismo, han optimizado el aparato electrónico que lee las señales electrónicas débiles que esos materiales emiten. Las innovaciones, a su vez, están creando aplicaciones que podrían estimular su adopción. Mediante un gran número de exposiciones a baja dosis, por ejemplo, los radiólogos obtienen el equivalente a una TC de ángulo limitado, que muestra un cáncer emergente sin los complejos procedimientos que la tomografía computarizada exige.

1. GENERADOR. La máquina de rayos X opera del mismo modo en todas las técnicas de detección. Un filamento caliente hace de cátodo y emite electrones que se aceleran, mediante alta tensión, hacia una placa anódica rotatoria. En la colisión se emiten fotones de rayos X.



VIA ANALOGICA



GEORGE RETSECK

2. RADIOGRAFIA CLASICA. Un chasis contiene capas fluorescentes que absorben los rayos X y emiten luz, y una placa fotográfica. La placa se retira y revela en un baño químico, de modo similar a las fotografías comunes. Para cada toma se inserta una placa nueva.

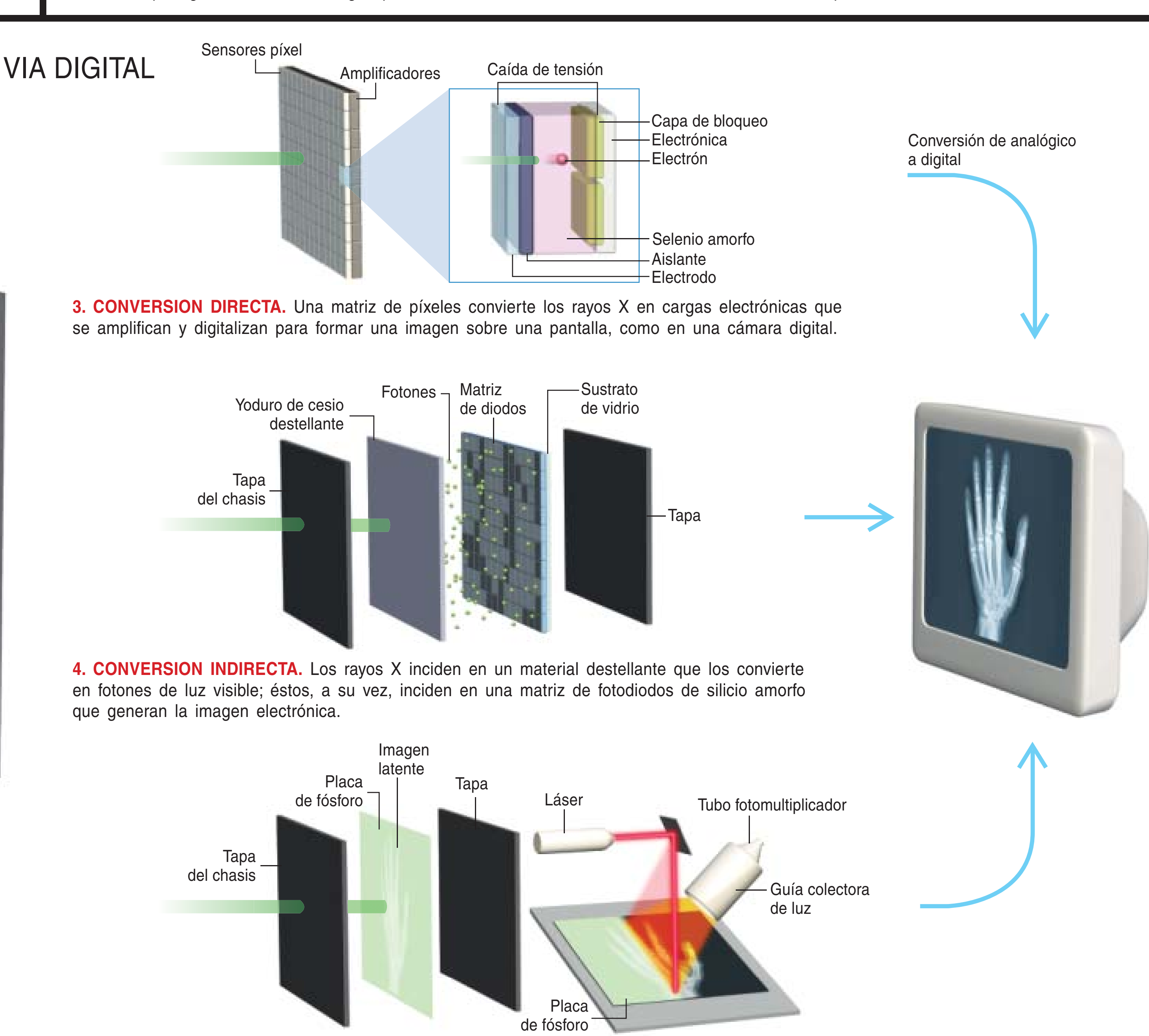
¿SABIA USTED QUE...?

➤DENTADURAS: Los dentistas han adoptado la técnica de la radiografía digital. En la boca del paciente se introduce un pequeño sensor plano, del tamaño de la placa fotográfica que se usó durante años. Un cable fino lleva la información de los píxeles a un ordenador. El sensor se esteriliza entre cliente y cliente. Son sistemas caros, pero eliminan los gastos de fotografía, reducen el tiempo de la visita (el paciente no debe esperar el revelado) y requieren dosis inferiores de rayos X.

➤ARTERIAS: Los cirujanos suelen emplear la fluoroscopia (filme de rayos X en tiempo real que muestra los órganos en movimiento) para guiar la inserción de catéteres en los vasos sanguíneos en el tratamiento de oclusiones y aneurismas. Los pacientes yacen bajo un enorme y pesado tubo intensificador de imagen en forma de tonel, que dificulta el acceso quirúrgico; además, la imagen pierde resolución en la periferia. Las máquinas digitales que ya se comercializan son más pequeñas y ligeras, dejan espacio para la acción de los cirujanos y generan imágenes que no pierden nitidez en los bordes.

➤EQUIPAJE: Los primeros escáneres que se emplearon en el control del equipaje de mano en los aeropuertos eran adaptaciones de los fluoroscopios clínicos, dotadas de congelación de imagen para facilitar el examen del interior de los objetos. Ahora los sistemas digitales están ganando terreno. El equipaje facturado se examina con máquinas que derivan de la tomografía computarizada: rayos X de energía elevada generan una serie de imágenes seccionales que se traducen en vistas tridimensionales. Los objetos se contrastan con una base de datos de explosivos y artículos de contrabando; si se detecta una coincidencia sospechosa, suena una alarma.

VIA DIGITAL



3. CONVERSION DIRECTA. Una matriz de píxeles convierte los rayos X en cargas electrónicas que se amplifican y digitalizan para formar una imagen sobre una pantalla, como en una cámara digital.

4. CONVERSION INDIRECTA. Los rayos X inciden en un material destellante que los convierte en fotones de luz visible; éstos, a su vez, inciden en una matriz de fotodiodos de silicio amorfo que generan la imagen electrónica.

5. ESTIMULACION. Una placa de fósforo pixelada atrapa los electrones excitados por los rayos X y crea una imagen latente. El chasis se introduce en un lector, donde un láser rojo ilumina cada píxel, produciendo un resplandor que se convierte en una imagen digital. La placa se borra con luz brillante.

Revolución científica

Vísperas newtonianas

ATOMS AND ALCHEMY. CHYMISTRY AND THE EXPERIMENTAL ORIGINS OF THE SCIENTIFIC REVOLUTION, por William R. Newman. The University of Chicago Press; Chicago, 2006.

CORRESPONDENCE OF JOHN WALLIS. Edición preparada por Philip Beeley y Christoph J. Scriba. Oxford University Press; Oxford, 2003-2005.

HUYGENS. THE MAN BEHIND THE PRINCIPLE, por C. D. Andriesse. Cambridge University Press: Cambridge, 2005.

HENRY MORE, 1614-1687. A BIOGRAPHY OF THE CAMBRIDGE PLATONIST, por Robert Cracker. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2003. THOMAS BROWNE AND THE WRITING OF EARLY MODERN SCIENCE, por Claire Preston. Cambridge University Press; Cambridge, 2005.

Poco a poco vamos adentrándonos en las vías que convergen en la obra magna de Isaac Newton. Desde la química se nos descubre el nuevo concepto de materia (*Atoms and Alchemy. Chymistry and the Experimental Origins of the Scientific Revolution*), desde la matemática, el análisis aritmético nos pone en las puertas del cálculo (*Correspondence of John Wallis*) y desde la física se nos pergeña una teoría precisa de la medición del tiempo y el movimiento, sin la cual no hubiera podido asentarse con solidez la disciplina (*Huygens. The Man behind the Principle*). Todo ello se desarrolla en un trasfondo de intensa avidez cultural (*Thomas Browne and the Writing of Early Modern Science*) e independencia de criterio (*Henry More, 1614-1687. A Biography of the Cambridge Platonist*).

Empezamos a conocer el lugar de privilegio que le corresponde a la alquimia en el alumbramiento de la química moderna, en su núcleo teórico —una nueva concepción de la materia— y en sus prácticas de laboratorio, a través de experimentos rigurosos. A las demostraciones empíricas de Robert Boyle y de Isaac Newton les precedió una transformación decisiva del concepto de los componentes últimos de la realidad y sus posibilidades de conjugación y recuperación. Y lo más novedoso: la misma alquimia medieval, depurada, acabará por modelar, junto con el desarrollo de la matemática, la filosofía natural mecanicista del siglo XVII. Hablamos de una época de transición protoquímica cuando se defendía todavía la transmutación de los metales en oro (*chrysopoeia*).

La tradición de la alquimia corpuscular fecha su punto de partida en el siglo XIII, con la redacción de la *Summa perfectionis* por un autodenominado "Geber", transliteración latina parcial de "Jabir ibn Hayyan", un supuesto autor árabe del siglo VIII. Lo mismo que sus seguidores, Geber, en realidad Pablo de Taranto, religioso franciscano, era escolástico, aristotélico. Pero no se inspiró en la *Física* ni en el *De coelo* del estagirita. Bebía en la *Meteorología* y en el *De generatione et corruptione*. En el libro IV de la *Meteorología* encontramos una detallada descripción corpuscular de la materia expresada en términos de *poroi* (poros) y de *onkoi* (corpúsculos) que pueden ocuparlos. Esta teoría subyace bajo el corpuscularismo experimental de la *Summa perfectionis*. Aunque dependiente de los modelos árabes, el texto fundacional de Geber constituía una composición original donde presentó una teoría de la mezcla que disentía de la atribuida a Aristóteles. Entiende la materia integrada por una mezcla de *minimae partes elementales* o *minima*, los cuatro elementos, que se unen y establecen una *fortissima compositio* para crear azufre y mercurio, principios, a su vez, de los metales.

Importa, antes de avanzar, delimitar el significado propio de los términos "mezcla", "composición" y "compuesto", nacidos del latín medieval: *mixtio, miscere, compositio, componere*. (Su interpretación moderna discrepa de su sentido medieval.) Para Aristóteles, "mezcla", o *mixis*, designaba la fusión de los ingredientes para formar un estado perfectamente homogéneo, mientras que "composición", o *synthesis*, indicaba un estado de partículas yuxtapuestas, como los granos de trigo y cebada agitados en un recipiente. (En el lenguaje de la química moderna, por el contrario, la "mezcla" designa una yuxtaposición mecánica, sin establecimiento de ningún enlace químico, mientras que "compuesto" significa el producto de una reacción química, donde el enlace químico mantiene unidos los componentes.) Los alquimistas escolásticos poseían ya cierta intuición del concepto de enlace.

La base experimental de la tesis de Geber reposa parcialmente en los procesos de laboratorio de sublimación, en particular la sublimación del mercurio y el azufre. Amén del vínculo especial que tiende la *fortissima compositio*, aporta otro factor responsable de la durabilidad: la *uniformis substantia*. ¿A qué se refería? Aristóteles había señalado que los ingredientes de una mezcla experimentaban una *henosis* o unificación durante el proceso de mezcla, por cuya razón todas las regiones espaciales de la mezcla eran "homeómeras", es decir, idénticas en todas sus partes. En la *Summa* de Geber, el azufre es "homeómero" en sus partículas debido a su carácter homogéneo.

Otro proceso distintivo de la alquimia geberiana, la calcinación, tomaba su nombre del calentamiento de la piedra caliza para producir caliza en polvo. Geber define la calcinación como la conversión de un objeto en

polvo, al eliminar la humedad que consolida sus partículas. Este es simplemente el proceso de exponer un metal u otra substancia a un calor intenso hasta que se reseca y se convierte en una sustancia polvorienta, una *calx*. Lo que, a su vez, evoca otro proceso alquímico, la "reducción al estado prístino". No debe confundirse el proceso de reducción que acabamos de mencionar con el significado químico moderno del término (asociado a las reacciones redox). Para los alquimistas, la "reductio" era la vuelta hacia atrás de un objeto, a su estado original, tras haber experimentado un cambio. También designaba la extracción de un metal a partir de un compuesto, una mena a menudo. Nos encontramos con una situación similar a propósito del uso alquimista de la "sublimación". El proceso no sólo podía partir de un material "seco" (es decir, sin disolver), sino también de un líquido, por ejemplo del mercurio.

La tesis geberiana de que las operaciones analíticas de laboratorio nos revelan los componentes fundamentales de la materia se convertiría en dogma central del sistema de Paracelso, en cuyas manos la alquimia acometió una metamorfosis absoluta. Se puso el énfasis en los procesos gemelos de análisis y síntesis (*spagyria*). La doctrina paracelsista fue atacada, entre otros, por Thomas Erastus, quien publicó en 1572 unas famosas *Disputationes de nova Philippi Paracelsi medicina*, donde el profesor de medicina en Heidelberg y rector de su universidad reasumía los argumentos contra los *tria prima* de Paracelso ya esgrimidos en su anterior *Explicatio quaestionis famosae illius, utrum ex metallis ignobilioribus aurum verum et naturale arte conflari possit* ("Explicación de la famosa cuestión de si el oro genuino y natural puede fabricarse a partir de metales más ruines por medio del arte"), un ataque contra la alquimia. Así como el nacimiento y muerte del hombre constituye un proceso lineal, con un punto de partida y un término definidos, sin proceso de vuelta, del mismo modo, aduce Erasto, no puede haber retorno de la privación a un hábito, salvo que hablemos de los cuatro elementos, los únicos que experimentan una restauración cíclica. La naturaleza permite la secuencia de agua-aire-agua, pero no la de hombre-cadáver-hombre, ni la de vino-vinagre-vino.



Christiaan Huygens (1629-1695)

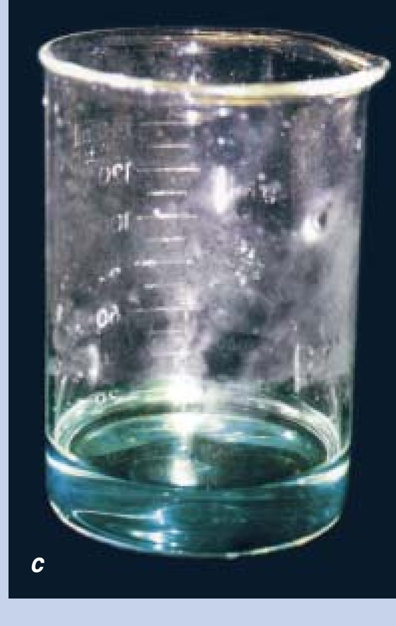
A Paracelso se opuso también, Andreas Libavius, quien deriva el término *spagyria* de *span* y *ageirein*, dos procesos gemelos de análisis y síntesis que se corresponden con la *diakrisis* y *synkrisis* de los griegos. Interpreta el texto del libro II de los *Meteoros* donde Aristóteles describe la evaporación y condensación del vino en agua (*hydor*), señalando que no se trata del agua "elemental", sino de un "mixto caliente, comburente y aromático" (alcohol etílico). Aboga por la existencia de los átomos democríteos en su *Alchymia* de 1606. En *De mundi corporumque mixtorum elementis* (Sobre los elementos del mundo y de los cuerpos mixtos), en 1608, distingue entre los cuatro elementos, que operan como envoltorios (*involucra*) o capas (*cortices*) y los primeros principios (*principia prima*), escondidos en ellos.

Conforme avanzaba el siglo XVII, la estrategia de Libavius de amalgamar Aristóteles, la *spagyria* paracelsista y el atomismo democríteo iba tomando cuerpo en un movimiento corpuscularista, que alcanzó su apogeo prenewtoniano en la *Hypommnemata physica* (Disertaciones físicas) de Daniel Sennert, aparecidas en 1636. Diecisiete años antes, este docente de la Universidad de Wittenberg enviaba a la imprenta un trabajo en el que se proponía reconciliar las opiniones divergentes de alquimistas, galenistas y aristotélicos. Pese a su título irenista, el libro en cuestión, *De chymicorum cum Aristotelicis et Galenicis consensu ac dissensu*, aportaba una demostración experimental convincente de que la materia, en su micronivel, era de índole corpuscular. La solución, que allanó el camino a la filosofía mecanicista, tenía su prehistoria.

Sennert se había graduado en la Universidad de Wittenberg en 1600. Dos años antes había terminado su *Epitome naturalis scientiae*, que contenía 26 disputas sobre filosofía natural. Su cambio hacia la alquimia se produjo en 1611, según reflejan sus *Institutiones medicinae*, donde se incluye una sección extensa sobre las operaciones necesarias en farmacia (*De operationibus ad Pharmacopoeiam necessariis*). Siguiendo la tradición establecida por la *Alchymia* de Libavius, Sennert declara que las operaciones de laboratorio pueden explicarse en términos de *diakrisis* y *synkrisis*. A esas dos operaciones había que añadir una tercera categoría, la *immutatio*, término latino que







Una lámina fina de plata cortada a pedazos (*a*). Este es el punto de partida de una de las más famosas “reducciones al estado prístino” de Daniel Sennert. Robert Boyle reproduciría después el mismo experimento. La secuencia de procesos que aquí se muestra se llevó a cabo en el departamento de química de la Universidad de Indiana, en el laboratorio de Catherine Reck.

Los fragmentos de plata se disuelven en ácido nítrico (*aqua fortis*) (*b*). El color azul proviene del cobre que suele contener la plata. Numerosos escritores premodernos hacen hincapié en el color azul hallado en las sales y disoluciones de plata. La nube pardusca corresponde a dióxido de nitrógeno gaseoso, que se desprende al disolver el metal. Se obtiene así una disolución, transparente y azul, de plata en ácido nítrico (*c*). Si se filtra, no se recoge ningún residuo. Se añade luego una disolución de carbonato potásico (sal de tártaro) con miras a iniciar la precipitación (*d*). De nuevo, se desprende dióxido de nitrógeno. Tras verter suficiente carbonato potásico, aparece en la superficie una pasta cortada, amarillenta, de carbonato de plata (*e*), que termina por depositarse en el fondo del vaso de precipitados. Se filtra la mezcla. El precipitado, el carbonato de plata, se lava. Se recoge en un crisol (*f*). Por fin, se calienta a 1000 grados centígrados (*g*). Se obtiene así dióxido de carbono, oxígeno y plata metálica, que se deja enfriar (*h*).



g

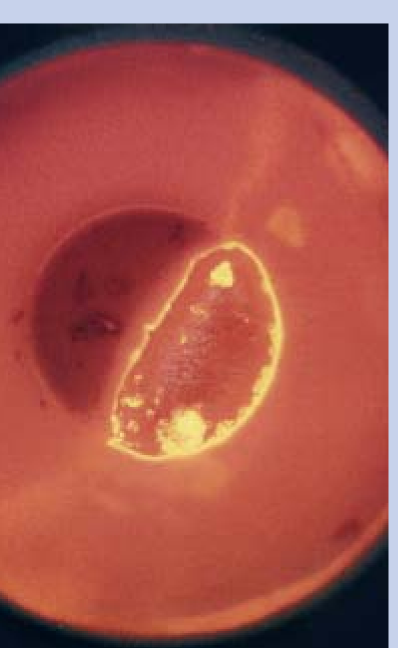
puede sustituirse por cambio, sustitución. En tres se resumen, pues, las actividades principales: asociación democrítea de átomos (*synkrisis*), disociación paralela de átomos (*diakrisis*) y reordenación de átomos (*inmutación*). Los metales pueden disolverse fácilmente si se han reducido a fino polvo por calcinación; tan finas son las partículas resultantes que pueden llamarse átomos (*quasi atomos*).

Su compromiso abierto con el atomismo de Demócrito se hace manifiesto en el *De chymicorum*. Para Sennert los cuatro elementos preceden a la formación de los *tria prima* (mercurio, azufre y sal), pero rechaza que, para crear una mezcla, deba darse una previa resolución en los cuatro elementos. Su famoso experimento de 1619 consistió en fundir juntos oro y plata para producir una aleación “homogénea”. La plata se disolvía luego por medio de *aqua fortis* (ácido nítrico), desapareciendo de la vista en la solución. Por último, la plata precipitaba en un “montón de innumerables átomos” por medio de sal de tártaro (carbonato potásico). El uso que hizo Sennert de la disolución y precipitación dejaba escasas opciones alternativas a la conclusión de que la plata aleada con el oro y, disuelta después en ácido nítrico, retenía intacta su “sustancia”. Atribuía la aparente desaparición de la plata en *aqua fortis* a su división en partículas sumamente finas. En su *Hypomnemata physica*, publicada en 1636, añadía una etapa ulterior: fluidificación de la solución de plata y *aqua fortis* a través de un filtro de papel. El hecho de que no dejara remanente demostraba la extraordinaria parvedad de las partículas de plata en combinación con el ácido; las suponía tan pequeñas, que atravesaban sin obstáculo los poros del papel. Dio así por demostrado sus dos tesis químicas: un metal aparentemente mezclado con un ácido o con otro metal retiene intacta su propia naturaleza y se halla compuesto de corpúsculos sutiles. El de Sennert constituyó un auténtico *experimentum crucis*.

Si Sennert ilustra la química que aprende Boyle, la matemática newtoniana tiene su antecedente en John Wallis (1616-1703). Se formó en Cambridge, donde recibió una sólida









instrucción humanística y filosófico-teológica con tímidas incursiones en el campo de la astronomía. Entre sus tutores, Benjamin Whichcote (1609-1683), una de las figuras clave de los platónicos de Cambridge.

El "platonismo de Cambridge" remite a un conjunto de pensadores preocupaciones religiosas y filosóficas, más o menos compartidas por un grupo de pensadores y teólogos que vivieron en el Cambridge de mediados del siglo XVII. Con Whichcote, se integraron en ese movimiento John Smith y Ralph Cudworth y Henry More (1617-88). Núcleo central al que podríamos sumar George Rust y Henry Hallywell. Todos los citados sin excepción eran "puritanos" o de profesión calvinista. Se propusieron rechazar el dogmatismo de su educación juvenil. Subrayaban los aspectos comunes de todas las confesiones. En apoyo de sus tesis apelaban a Plotino y los Padres de la Iglesia de tendencia platonizante.

More defendió desde el comienzo el fomento de la incipiente filosofía natural, en la que veía numerosas ventajas para la defensa racional de la doctrina cristiana. Hombre de su tiempo, avala, sin embargo, la existencia de la brujería. Estampa de esa educación plural y vocación universalista fue Thomas Browne, arquetipo del hombre anfibio que él describió, es decir, del que se halla adaptado para vivir en el mundo de lo corpóreo y en el de lo espiritual, de las ciencias naturales y de la cultura humanística.

Si interesante fue su labor arqueológica y filológica, no menos poderosa fue su reflexión filosófica, iniciada en plena mocedad con *Religio Medici*. Aunque redactada en los años treinta del siglo XVII, tardó un decenio en salir a la luz pública, en 1642. Dedica su *Pseudodoxia Epidemica* a los errores dominantes entre el vulgo y, a un *totum revolutum* de historia, botánica y teoría de las signaturas, su *Urne-Buriall* y *The Garden of Cyrus*.

El padre del movimiento neoplatónico, Whichcote, inspiraría el primer escrito de Wallis, un tratado que llevaba por título Truth Tried (1643), que objetaba las tesis presentadas en *The Nature of Truth* (1640), de Robert Greville. Desde 1649 y hasta su muerte en 1703, ocupó la cátedra Savilian de geometría en Oxford, recompensa por los servicios prestados como decodificador al bando de los Parlamentaristas en las guerras civiles de los años cuarenta del siglo XVII. Miembro fundador de la Regia Sociedad londinense, a su alrededor giraba la actividad científica e intelectual de Inglaterra de la segunda mitad del XVII, según queda reflejada en su extensa correspondencia, que abarca un millar y medio largo de cartas.

Wallis llegó a Oxford con un escaso bagaje matemático, que remedió muy pronto. Transcurridos unos años escribió su obra más ambiciosa, *Arithmetica infinitorum*, publicada en 1655. Preparó el terreno para el descubrimiento del cálculo infinitesimal de Newton y Leibniz y modernizó la matemática inglesa a través de la introducción de métodos analíticos. La *Arithmetica* no se compone de capítulos ni secciones al uso. Consta de una serie de 194 proposiciones (lemas, teoremas y corolarios), algunos seguidos por un "escolio" o comentario. Aborda sumas de potencias enteras y corolarios geométricos, sumas de potencias fraccionarias y corolarios geométricos, sumas de magnitudes compuestas y corolarios geométricos, propiedades de números figurados, interpolación de tablas, fracciones continuas e interpolaciones demostradas geométricamente. Encontramos aquí la fracción infinita de $4/\pi$.

Coetáneo de la *Arithmetica* fue su tratado *De sectionibus conicis*. Aparecieron juntos. Aquí Wallis ofrece el primer tratamiento algebraico de las secciones cónicas, disciplina

de cuyo dominio da buena muestra en un *Treatise of Algebra* (1685), la primera historia de la cuestión escrita en inglés. Unos años antes había echado su cuarto a espadas en física con *Mechanica sive tractatus de motu* (1669-70) y con las observaciones astronómicas que remitía John Flamsteed. En el marco de la disputa inglesa sobre la reforma del calendario, Wallis esgrimió argumentos astronómicos, históricos y políticos para oponerse al calendario gregoriano.

"Sus cartas", le escribía G. W. Leibniz a Wallis en 1697, "siempre comunican algo que sirve para aumentar el conocimiento". Y en verdad han constituido fuente inagotable para nuestra comprensión del progreso de la ciencia y el estado de la teología en su tiempo. Por singularizar algunos ejemplos, la correspondencia mantenida con Johannes Hevelius, autor de una reputada *Selenographia* de Hevelius, se inicia a propósito de este escrito astronómico. A John Smith le comunicaba sus primeros resultados matemáticos. Smith había conseguido hallar reglas para extraer raíces de ecuaciones cúbicas, que más tarde descubrió coincidían con las de Cardan. La naturaleza de las ecuaciones cúbicas y bicuadráticas fue también tema de intercambio con Brouncker. Una carta escrita hacia finales de 1652, en la que planteaba una cuestión sobre su cuadratura del círculo, parece haber iniciado su ciclo de cartas con Christiaan Huygens (1629-1695), una vez que éste remitiera un ejemplar de su *Extasis* a Oxford en julio de 1652. De la cuadratura pasaron a cuestiones sobre astronomía. Cuando Huygens le comunicó su descubrimiento de un nuevo satélite de Saturno en anagrama, Wallis se lo devolvió descifrado y añadiendo la infausta noticia de que un hallazgo similar se había registrado antes en Inglaterra.

Christiaan Huygens era hijo de Constantijn Huygens, humanista brillante que ocupó a lo largo de su vida puestos principales en la administración de los estados holandeses independientes. Interesado por todo lo nuevo, incluido la óptica y la mecánica, Constantijn contó entre sus amigos ilustres a René Descartes, quien se había trasladado a Holanda en 1629. Christiaan, que aprendió geometría cartesiana en lecciones privadas dictadas por Franz van Shoote, enraizó ya su filosofía natural en la física del francés. Estudió en las universidades de Leyden y Breda. Aunque destinado por su progenitor a la carrera diplomática, nunca abandonó su natural inclinación hacia la matemática y la ciencia.

A la matemática consagró los primeros años de maduración, empezando por los griegos. En el meridiano del siglo generalizó los resultados de Arquímedes; compuso un tratado sobre los cuerpos flotantes (aparecido póstumamente), donde relacionaba áreas de cónicas con sus centros de gravedad (*Theoremata de quadratura*, 1651), e ideó un método mejor de aproximación de pi mediante polígonos inscritos y circunscritos (*De circuli magnitudine inventa*, 1654).

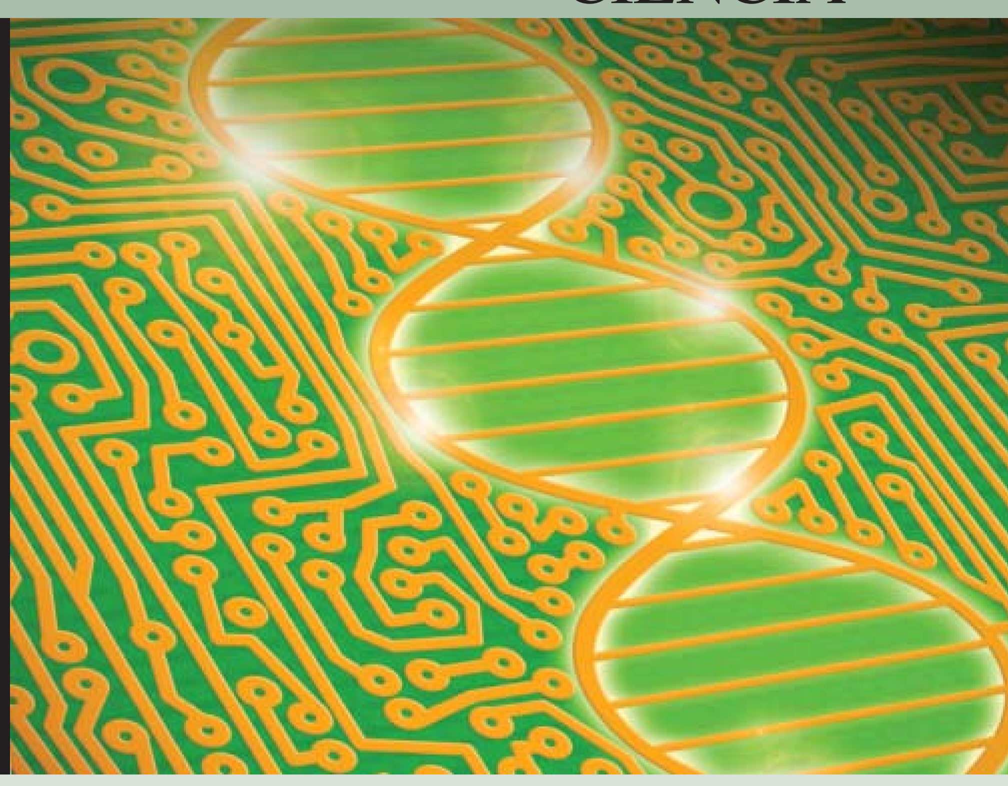
En física se adhirió al postulado cartesiano de que todo sistema podía reducirse a materia en movimiento, un movimiento relativo para ser precisos. Abordó muy pronto el análisis de la percusión. Pero, aunque terminó el *De motu corporum ex percussione* hacia 1656, y presentó resúmenes a la Academia de París y a la Regia Sociedad de Londres, no publicó nunca la obra completa, que apareció póstuma en 1703. La fama de Huygens va asociada a sus aportaciones en dióptrica y astronomía. Se ocupa aquélla de la convergencia de la luz mediante lentes. En plena onda moderna, conjuga la matemática de la dióptrica con el pulido de espejos y, a la manera de Galileo, construye su propio telescopio para observar mejor los cuerpos celestes y sus trayectorias. Así descubrió Titán, la luna mayor de Saturno (*De Saturni Luna observatio nova*, 1656) y percibió el perfil cambiante del planeta, de lo que infirió que se encontraba rodeado por un anillo (*Systema Saturninum*, 1659).

En 1665 Luis XIV le invitó a formar parte de la *Académie Royale des Sciences* de París, su ciudad de residencia desde 1666 hasta 1681. En esa llamada tuvo mucho que ver su obra sobre instrumentación: telescopios, lentes y el reloj de péndulo, el primer marcador fiable del tiempo para uso astronómico y navegación. Sobre éste escribió un clásico del siglo XVII, *Horologium oscillatorium* (1673), que recoge sus resultados sobre mecánica: caída libre, péndulo compuesto y fuerza centrífuga. Se mezclan, cuando procede, con descripciones geométricas de las envolventes. Para entonces había deducido ya las reglas de la colisión elástica a partir de la invariancia galileana. El *Horologium oscillatorium* consta de cinco partes, interdependientes. La primera describía el nuevo reloj de péndulo, con su variante para uso marino; incluía una tabla de ajuste del tiempo exigido por la desigualdad del día solar; como reconocía el propio Huygens, en virtud de la excentricidad de la órbita terrestre y la oblicuidad de la eclíptica, varía la longitud del día. En la segunda y tercera partes se propone demostrar el carácter isócrono del péndulo cicloidal. En aquélla ofrece un conjunto de proposiciones sobre la caída de los graves, empezando por la hipótesis del movimiento rectilíneo de inercia e introduciendo luego el movimiento compuesto instado por la gravedad. En la parte tercera desarrolla el concepto de evoluta. Tras detenerse, en la cuarta, en los parámetros físicos precisos para el problema del péndulo compuesto, completa el índice la parte quinta, con otro reloj, basado éste en un modelo matemático tridimensional, y regulado por un péndulo en rotación. Agrega 13 teoremas sobre la fuerza centrífuga. Sobre la fuerza centrífuga, concepto que va ligado al de *conatus*, meditó largamente. El conato, que causa la tensión del péndulo, es proporcional a la fuerza estática y pone en correspondencia el peso y la fuerza centrífuga. El peso o gravedad centrípeta equilibra exactamente a la fuerza centrífuga.

En su *Traité de la lumière* (1690) hallamos la primera descripción de la propagación ondulatoria de la luz, de cuyo movimiento deduce las leyes de la refracción. Aplicó la teoría de las evolutas a la óptica para inferir el frente de onda de luz en su movimiento a través de una pieza de espato de Islandia. En la doble refracción observada encontró la prueba de que la luz debe moverse de forma ondulatoria. Más aún: aportó la definición de frente de onda, conocida hoy en su honor por principio de Huygens, que es la tangente común de todas las ondas secundarias que emanan de la posición anterior de la onda.

—Luis Alonso

INVESTIGACION y CIENCIA



FABRICAS PARA LA BIOLOGIA, por el grupo BIO FAB:

Los principios y métodos aprendidos de los logros ingenieriles se aplican a la transformación de la biotecnología: de artesanía especializada a industria madura.

SUPERVOLCANES, por Ilya N. Bindeman

El análisis de cristales microscópicos de ceniza volcánica arroja luz sobre el curso de las erupciones más devastadoras del mundo.

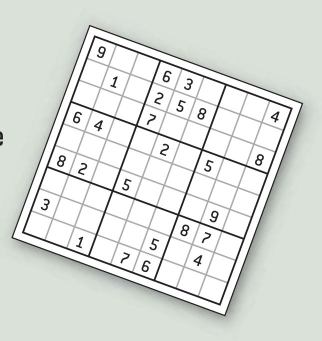


CONTROL DE ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR MOSQUITOS, por Fred Gould, Krisztian Magori y Yunxin Huang

Genes manipulados que bloquean la transmisión de la malaria y el dengue se transportan sobre ADN egoísta y se extienden por las poblaciones naturales.

LA CIENCIA DEL SUDOKU, por Jean-Paul Delahaye

Ni las matemáticas ni la aritmética se necesitan para resolver un sudoku. Aun así, el juego plantea varios problemas matemáticos.





COSTAS CONTAMINADAS, por Michael A. Mallin

El desarrollo incontrolado a lo largo de las costas estadounidenses provoca una creciente contaminación por microorganismos patógenos en playas y viveros de mariscos.